

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
SANTIAGO - CHILE



**“GUÍA DE DISEÑO PARA LA REHABILITACIÓN DE PISTAS DE
AERÓDROMOS EN ZONAS REMOTAS MEDIANTE EL RECICLADO
CON ASFALTO ESPUMADO”**

MICHELLE PAZ MEDINA URBINA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL**

Profesor Guía: Álvaro González Vaccarezza
Profesor Correferente: Alelí Osorio Lird

Octubre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Guía de Diseño para la Rehabilitación de Pistas de Aeródromos en Zonas Remotas mediante el Reciclado con Asfalto Espumado

Nombre del candidato(a): Michelle Paz Medina Urbina

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín

Departamento: Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Álvaro Andrés González Vaccarezza, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 14-11-2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18-11-2025

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

A mis padres Cándida y Jaime.

AGRADECIMIENTOS

Mi principal agradecimiento es para el profesor Álvaro, quien me acompañó desde un principio en el desarrollo de este trabajo, enseñándome con tranquilidad y empatía, y reenfocando mis ideas cuando era necesario. Valoro muchísimo las palabras de apoyo que él y la profesora Alelí me brindaron cuando lo necesité, en donde me mostraron que un docente hace mucho más que enseñar en el aula, y que su calidad humana es incluso mayor que sus cualidades académicas.

Agradezco también a Patricio Pinilla, quien siempre tuvo la disposición de ayudarme, y del que pude aprender a través de la práctica en el laboratorio y de su gran experiencia.

Finalmente, agradezco a mi familia por el apoyo incondicional en este proceso, y en especial, a mi hermana Anita, por tomar este proyecto como una causa común y darme la orientación que necesitaba para poder terminar. Sin su apoyo no sería posible llegar hasta acá.

RESUMEN

Este trabajo desarrolla una guía para la rehabilitación de pavimentos de aeródromos a través del reciclado in situ con asfalto espumado, enfocándose en las condiciones climáticas y de tráfico aéreo de la región de Aysén. La guía comprende los estudios previos del pavimento existente, la metodología a seguir para diseñar la mezcla de bitumen estabilizado con asfalto espumado, los pasos a seguir para diseñar estructuralmente la pista de un aeródromo bajo los criterios de la FAA, una recomendación para la capa de rodadura y, por último, especificaciones técnicas para la construcción. A través de la revisión de la literatura y normativas, se logró determinar una banda granulométrica ideal para aplicar esta técnica de reciclado. También se obtuvo el diseño de un pavimento flexible para aeródromos de bajo tránsito en Aysén, el cual se compone de un tratamiento superficial triple, una base estabilizada de 14 cm de espesor, y una subbase granular de 15 cm de espesor. Este pavimento, de acuerdo a las pruebas en softwares FAARFIELD y MEPADS, es capaz de soportar las cargas de aeronaves livianas y las cargas de un avión de emergencia típico.

Este trabajo entrega una metodología clara para la conservación y mejoramiento de pavimentos existentes mediante una técnica que, en comparación con un recapado tradicional, reduce el impacto ambiental, los costos y el tiempo de construcción.

Palabras Clave: Reciclado con asfalto espumado; diseño de mezcla; diseño estructural; tratamiento superficial.

ABSTRACT

This work develops a guide for airfield pavements rehabilitation through in situ recycling with foamed asphalt, focusing on the climate and air traffic conditions of Aysén region. The guide includes preliminary studies of the existing pavement, a methodology for designing the bitumen-stabilized mix with foamed asphalt, steps to structurally design an airfield runway based on FAA criteria, recommendations for the wearing course, and technical specifications for construction. Through a review of literature and regulations, an ideal grading band was determined to apply this recycling technique. A flexible pavement design was also developed for low-traffic airfields in Aysén, consisting of a triple surface treatment, a 14 cm stabilized base, and a 15 cm granular sub-base. According to tests using FAARFIELD and MEPADS software, this pavement is capable to support loads related to light aircraft and a typical emergency aircraft.

This work provides a clear methodology for the conservation and improvement of existing pavements using a technique that, compared to traditional resurfacing, reduces environmental impact, costs, and construction time.

Keywords: Foamed asphalt recycling; mix design; structural design; surface treatment.

GLOSARIO

FAA: Federal Aviation Administration

DGAC: Dirección General de Aeronáutica Civil

DAP: Dirección de Aeropuertos

JAC: Junta Aeronáutica Civil

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement

BSM(s): Bitumen Stabilised Material(s)

TG2: Technical Guideline, Asphalt Academy

MC: Manual de Carreteras

MR: Módulo resiliente

ITS: Resistencia a la tracción indirecta

UCS: Resistencia a la compresión no confinada

FWD: Deflectómetro de impacto

CDF: Factor de daño acumulado

PCI: Pavement condition index

IP: Índice de plasticidad

MEE: Millones de ejes equivalentes

AE: Asfalto espumado

ER: Expansion rate/ razón de expansión

HL: Half-life/ vida media

CA: Cemento asfáltico

OMC: Contenido de humedad óptimo de compactación

TSR: Resistencia a la tracción retenida

TSD: Tratamiento superficial doble

TST: Tratamiento superficial triple

IRI: Índice de regularidad internacional

I.F.: Inspector fiscal de obra

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ÁREA DE ESTUDIO	1
1.1.1	DESCRIPCIÓN DEMOGRÁFICA	1
1.1.2	DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA	2
1.1.3	IMPORTANCIA DE LA REGIÓN Y AUMENTO DE DEMANDA	2
1.2	OPORTUNIDAD Y PROBLEMA	3
1.3	OBJETIVO GENERAL	4
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5	ALCANCES	4
2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	GENERALIDADES	5
2.2	RECICLADO EN FRÍO	5
2.2.1	TREN DE RECICLAJE	6
2.2.2	TIPOS DE RECICLADO EN FRÍO	7
2.2.3	VENTAJAS DEL RECICLADO EN FRÍO	8
2.3	FUNDAMENTOS DEL ASFALTO ESPUMADO	9
2.3.1	MATERIALES	10
2.3.2	PROPIEDADES DE UNA BSM CON ASFALTO ESPUMADO	13
2.4	DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	14
2.4.1	VIDA DEL PAVIMENTO	15
2.4.2	CARACTERIZACIÓN DE UNA BSM CON ASFALTO ESPUMADO	15
2.4.3	DISEÑO FAARFIELD	19
3	DESARROLLO	23
3.1	INVESTIGACIONES PREVIAS	24
3.1.1	INFORMACIÓN HISTÓRICA DEL PAVIMENTO	24
3.1.2	ESTIMACIÓN DEL TRÁFICO DE DISEÑO	24
3.2	INSPECCIÓN DEL TERRENO	25
3.2.1	MÉTODO DE LAS DEFLEXIONES	25
3.2.2	INSPECCIÓN VISUAL	26
3.3	OBTENCIÓN DEL PCI	26
3.4	MUESTREO Y ENSAYOS	27
3.4.1	EXCAVACIÓN DE CALICATAS	27
3.4.2	EXTRACCIÓN DE TESTIGOS	28
3.4.3	ENSAYOS DE LABORATORIO	29

3.5	REPORTE DE EVALUACIÓN	29
4	DISEÑO DE MEZCLA	30
4.1	GENERALIDADES	30
4.1.1	MATERIALES CONSTITUYENTES	31
4.2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLA	34
4.2.1	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS	35
4.2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA ESPUMA	36
4.2.3	FABRICACIÓN DE PROBETAS	36
4.2.4	ENSAYOS ITS	37
4.2.5	ENSAYO UCS	38
4.2.6	INFORME	39
5	DISEÑO ESTRUCTURAL	40
5.1	COMPOSICIÓN DEL TRÁNSITO AÉREO EN LA REGIÓN DE AYSÉN	40
5.1.1	ESTADÍSTICAS DEL TRÁFICO AÉREO	41
5.1.2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	42
5.1.3	APLICACIÓN DEL MÉTODO FAARFIELD	44
5.2	VERIFICACIÓN MEPADS	48
5.3	HELADAS ESTACIONALES	52
5.3.1	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE LAS HELADAS	53
5.4	DISEÑO DE PAVIMENTOS USANDO EL MÉTODO CBR	54
5.4.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO	56
6	TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	58
6.1	TIPOS DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y SELECCIÓN DE CAPA DE RODADURA	58
6.2	CASOS DE ÉXITO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL MÚLTIPLE	61
6.2.1	RUTA 5 NORTE, CHAÑARAL - TSD	61
6.2.2	RUTA 5 NORTE, POLPAICO - TSD	61
6.2.3	AERÓDROMO DE HUANCABAMBA - TST	62
6.3	COMENTARIOS	62
7	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	63
7.1	MATERIALES	63
7.1.1	MATERIAL GRANULAR	63
7.1.2	BITUMEN	64

7.1.3	AGREGADO MINERAL O FILLER ACTIVO	64
7.1.4	AGUA	65
7.2	EQUIPOS	65
7.2.1	RECICLADORA	65
7.2.2	EQUIPOS DE COMPACTACIÓN Y PERFILADO	66
7.2.3	CAMIONES CISTERNA	66
7.3	DISEÑO DE MEZCLA	67
7.3.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ESPUMA	67
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
10	ANEXOS	73
10.1	BANDAS GRANULOMÉTRICAS SEGÚN LITERATURA	73
10.2	BANDA GRANULOMÉTRICA RECOMENDADA	73
10.3	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLA	74
10.3.1	MUESTREO Y PREPARACIÓN	74
10.3.2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS	75
10.4	TRÁNSITO AÉREO EN REGIÓN DE AYSÉN	82
10.5	CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	83

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 : Proceso de reciclado dentro de la cámara/tambor. Wirtgen, 2004.	6
Figura 2-2: Tren de reciclado con asfalto espumado. Wirtgen, 2020.....	7
Figura 2-3: Microestructura de la mezcla con asfalto espumado. Paniagua et al, 2013.	10
Figura 2-4: Bandas granulométricas para mezclas con AE. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 2-5: Relación entre propiedades de asfalto espumado y contenido de agua. Wirtgen, 2004.	13
Figura 2-6: Comportamiento de pavimentos flexibles. Jara, 2019.	14
Figura 2-7: Factores de drenaje a considerar en el uso de la Ecuación 1. Wirtgen, 2004.	16
Figura 2-8: Resultados de Mr a través de ensayos triaxiales, para probetas curadas y mojadas. Halles, 2013.	17
Figura 2-9: Mr de ensayos triaxiales con una presión constante de 200 kPa. Dal Ben, 2014.	18
Figura 2-10: Mr de probetas curadas secas con diferentes periodos. Vasconcellos, 2015.	19
Figura 2-11: Ancho efectivo del neumático. FAA, 2016.	21
Figura 3-1 : Escala de PCI estándar y de aeropuertos. DAP, 2017.....	27
Figura 3-2: Excavación y sección típica de una calicata. Wirtgen, 2004.	28
Figura 4-1: Granulometría ideal para BSM con asfalto espumado. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 4-2: Efecto del agua en las características de la espuma. Austroads, 2019.....	33
Figura 4-3: Proceso de diseño de mezcla para BSM con asfalto espumado. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 4-4: Mezclador de paleta de doble eje.....	36
Figura 5-1: Estadísticas de operaciones en aeródromos de la región de Aysén. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 5-2: Proceso de diseño estructural para pavimentos de aeródromos. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 5-3: Diseño preliminar en FAARFIELD.....	44

Figura 5-4: Flota de aviones registrada, con proyección anual de crecimiento estimada.	44
Figura 5-5: Espesores optimizados por el software.	45
Figura 5-6: Contribución de la flota de aeronaves al valor de CDF.	45
Figura 5-7: Diseño preliminar del pavimento para el paso de un avión Hércules C-130.	46
Figura 5-8: Aumento de la exigencia en las cargas de aeronaves.	46
Figura 5-9: Representación de las zonas que presentan mayor daño estructural dado los espesores y flota mencionados.	47
Figura 5-10: Diseño estructural por FAARFIELD para la flota mencionada.	47
Figura 5-11: Curva de daño acumulado para el diseño propuesto por FAARFIELD.	48
Figura 5-12: Parametrización de ecuación de fatiga para asfalto espumado.	49
Figura 5-13: Puntos de apoyo de aeronaves livianas.	49
Figura 5-14: Puntos de apoyo del avión Hércules C-130.	50
Figura 5-15: Espesores y características del pavimento a verificar.	50
Figura 5-16: Distribución de cargas de un avión de emergencia.	51
Figura 5-17: Resultados obtenidos de fatiga provocada por un avión de emergencia.	51
Figura 5-18: Resultados de fatiga provocada por el paso del DHC-6-300.	52
Figura 5-19: Clasificación de suelos según susceptibilidad a las heladas. FAA, 2016.	52
Figura 5-20: Índice de congelamiento para la ciudad de Balmaceda.	54
Figura 5-21: Curvas de diseño de pavimentos flexibles para aeronaves livianas. FAA, 1955.	56
Figura 5-22: Comparación de espesores obtenidos a través del método CBR y método empírico mecanicista	57
Figura 10-1: Estructura tipo para tránsito pesado. DV, 2002.	84

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Rangos para Mr. Fuente: Elaboración propia	19
Tabla 4-1: Acciones para mejorar resistencia a mecanismos de falla típicos de BSMs. TG2, 2020.	31
Tabla 4-2: Especificaciones para áridos de recebo. Fuente: MC Vol5, 2020.....	35
Tabla 4-3: Separación de material por tamiz	35
Tabla 4-4: Guía para estimar contenido nominal de bitumen. Fuente: TG2, 2020.	37
Tabla 5-1: Aeronaves civiles con base en la región de Aysén. DAP, 2013.	40
Tabla 5-2: Aeronaves más frecuentes registradas en los aeródromos de Aysén. DAP, 2013. ...	41
Tabla 5-3: Operaciones anuales en principales aeródromos de Aysén. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 5-4: Esfuerzos y deformaciones máximas debido al paso de un avión de emergencia. ...	51
Tabla 5-5: Clasificación de reducción de resistencia de Subrasante	53
Tabla 6-1: Características de riegos asfálticos.	59
Tabla 6-2: Características de tratamientos superficiales bituminosos.	59
Tabla 7-1: Graduación requerida.	63
Tabla 7-2: Requerimientos para áridos de recebo.	67
Tabla 10-1: Granulometrías recomendadas para estabilización con asfalto espumado	73
Tabla 10-2: Banda granulometría recomendada para estabilización con AE en la Región de Aysén.	73
Tabla 10-3: Separación de material por tamiz	74
Tabla 10-4: Cantidades de muestras requeridas por ensayo	75
Tabla 10-5: Aeronaves con base en la región de Magallanes.	82
Tabla 10-6: Aeronaves con base en la región de Los Lagos.	82

1 INTRODUCCIÓN

Un aeródromo consiste en toda área, terrestre o acuática, habilitada por la autoridad aeronáutica para el despegue, aterrizaje y maniobra de aeronaves. Un aeropuerto, en tanto, corresponde a un aeródromo público habilitado para la salida y llegada de vuelos internacionales, vale decir, que cuenta con los servicios de aduana, migración y control de sanidad. (DGAC, 2005)

Chile cuenta con una red aeroportuaria compuesta por 344 aeródromos y aeropuertos, la cual se subdivide en la red primaria, secundaria, de pequeños aeródromos y aeródromos militares. (DGAC, 2020)

La red primaria consta de 16 aeropuertos/aeródromos y opera regularmente aviación comercial, militar, corporativa y general; teniendo como objetivo permitir una conexión tanto nacional como internacional. La red secundaria está compuesta por 14 aeródromos y posibilita operaciones regulares y no regulares de todo tipo de aviación, a menor escala que la red primaria, representando un aporte a la economía regional y local. Por último, la red de pequeños aeródromos, compuesta por 314 pistas, cumple la labor de entregar conectividad y soberanía de localidades apartadas del territorio, facilitando el contacto entre las zonas rurales y urbanas.

Particularmente, en la XI Región de Aysén se ubican 28 aeródromos fiscales de uso público, de los cuales se destacan los aeródromos de Balmaceda, Teniente Vidal y Melinka por su alto número de operaciones, donde cada uno promedia más de 3,000 operaciones anuales (JAC, 2020). De hecho, el aeródromo de Balmaceda es el único de la región que pertenece a la red primaria nacional.

Los tres aeródromos mencionados poseen una pista pavimentada, ya sea de hormigón o asfalto, que se justifica debido a su demanda de tránsito aéreo. Sin embargo, existen muchos otros aeródromos cuyas pistas, debido a su bajo nivel de demanda de operaciones, solo poseen material granular compactado o una capa de rodadura con tratamiento superficial sobre una base granular. Este trabajo tendrá su enfoque en este último tipo de aeródromos, caracterizados por realizar escasas operaciones al año y tener una pista con tratamiento superficial de asfalto.

1.1 Área de estudio

1.1.1 Descripción demográfica

La Región de Aysén del General Ibáñez del Campo está compuesta administrativamente por 4 provincias, las cuales se subdividen en 10 comunas. Su superficie que abarca $108,494 \text{ km}^2$ y tiene una población de 103,158 habitantes, convirtiéndose en la región menos poblada del país y con la segunda menor densidad poblacional (0.95 hab/ km^2), después de la región de Magallanes (0.1 hab/ km^2).

Aproximadamente, el 52% de sus habitantes son hombres y el 48% son mujeres, además de acuerdo con estimaciones del INE, Aysén es la región del sur con mayor proporción de población infantil (23%) y ocupa el tercer puesto a nivel nacional; sin embargo, la población sigue la misma tendencia nacional de envejecimiento acelerado. Por otro lado, el 80% de los habitantes viven en zonas urbanas, principalmente en las ciudades de Coyhaique y Aysén.

En el plano económico se tiene que el PIB regional para el año 2016 fue de MM\$751, representando el 0.52% del PIB nacional, aproximadamente. Las principales actividades económicas son la pesca, administración pública y servicios personales, y cabe mencionar que durante la última década ha crecido la actividad turística en la región. Por otro lado, de acuerdo con el IDERE 2017, la región ocupa el segundo lugar en *Bienestar económico*, encontrándose un 4.6% de la población bajo la línea de la pobreza por ingresos.

1.1.2 Descripción geográfica

La región presenta una geografía muy compleja que requiere dividir la zona en cinco áreas marcadas: área de archipiélago, depresión central, cordillera andina, cordones subandinos y relieves planiformes orientales. La compleja irregularidad del terreno, sumada a las condiciones climáticas propias de la zona, dificultan la conectividad entre localidades, además de afectar negativamente el traslado de carga y pasajeros desde o hacia las otras regiones del país. (SERNATUR, 2014)

La conectividad terrestre se genera a través de la carretera Austral (Ruta 7), la cual inicia en Puerto Montt (Región de Los Lagos) y luego de 1,240 km de extensión, finaliza en Villa O'Higgins, última localidad de la región de Aysén.

La región se divide en 4 provincias:

1. Provincia de Aysén: Se ubica al norponiente de la región y comprende el 48% de la superficie regional, caracterizado principalmente por un sinnúmero de islas, archipiélagos y canales. Entre sus principales atractivos turísticos se encuentra el Parque Nacional Queulat, la Reserva Nacional Lago Rosselot, el Archipiélago de las Guaitecas y Puerto Cisnes.
2. Provincia de Coyhaique: Se ubica al nororiente de la región y si bien comprende una pequeña porción del territorio regional, alrededor del 55% de la población reside acá. La ciudad de Coyhaique es una ciudad turística en sí misma pues ofrece variedad hotelera, gastronómica, actividades culturales y comerciales.
3. Provincia de General Carrera: Ubicada en la zona central de la región, esta provincia posee uno de los principales atractivos turísticos de la región: las capillas de mármol, cercanas a la localidad de Puerto Tranquilo. También se destaca el Lago General Carrera, cuenca lacustre más grande de Chile y uno de los más profundos de América.
4. Provincia de Capitán Prat: Es la provincia más austral de la región y además la menos poblada. Su geografía se caracteriza por paisajes moldeados por el paso de Glaciares, presentando zonas montañosas, ríos turquesa y glaciares milenarios. Sus principales atractivos turísticos son los Campos de Hielo y el Río Baker.

1.1.3 Importancia de la Región y aumento de demanda

En el caso de la Región de Aysén la red aeroportuaria cobra una mayor relevancia puesto que no existe conectividad terrestre con las demás regiones del país además del vínculo con la ciudad de Puerto Montt a través de la Carretera Austral y, por lo tanto, el acceso a las distintas localidades debe ser por vía aérea o marítima. En este sentido, los aeródromos permiten acercar

los servicios básicos a la comunidad, contribuyendo al desarrollo social y económico de la zona; además de aumentar la soberanía sobre el territorio nacional.

También cabe mencionar que el sur de esta región colinda con el campo de hielo patagónico sur, que corresponde a la tercera mayor masa de hielo y, por lo tanto, reserva de agua dulce en el planeta después de la Antártida y Groenlandia. Dicho territorio es compartido con Argentina y, si bien el 85% de la extensión pertenece a Chile y solo un 15% al país vecino, los límites fronterizos aún no han sido demarcados, lo que convierte a Aysén en una zona potencialmente clave en términos geopolíticos.

Producto de lo inhóspito de la región, los aeródromos fueron pensados originalmente para otorgar soberanía y cumplir una demanda muy reducida de operaciones. Sin embargo, el crecimiento de la población y el aumento del interés por el turismo en la región ha generado que últimamente se observe un crecimiento sostenido en la cantidad de pasajeros transportados por año. Un ejemplo de esto es el Aeródromo de Balmaceda, el cual ha mostrado una tasa de crecimiento anual promedio de 8.6% en el número de pasajeros durante los últimos 10 años (CPI, 2019); y aunque no es válido asumir las mismas cifras para otros aeródromos cercanos más pequeños, sí es posible asumir que presentan algún aumento en sus operaciones.

Este aumento continuo de las operaciones implica mayores demandas estructurales, lo cual, sumado al envejecimiento natural del asfalto, conduce a una necesidad de mantenimiento o rehabilitación en las capas de rodadura de estos aeródromos.

1.2 Oportunidad y Problema

Todos los pavimentos se diseñan para una determinada vida útil, asumiendo que a lo largo de ella se presentarán deterioros como grietas o deformaciones, los cuales se vuelven más severos con el tiempo hasta llevar al pavimento a un estado de falla. Una forma de mejorar la condición de un pavimento y con ello extender su vida útil, es realizar una rehabilitación oportuna y adecuada a las necesidades funcionales y estructurales, convirtiéndose además en una alternativa más eficiente que la reconstrucción al momento de la falla del pavimento.

Por otro lado, considerando que estos aeródromos fueron contruidos con bases granulares (y subbase en algunos casos) de buena resistencia, es posible plantear la opción de una rehabilitación a través del reciclado del mismo pavimento, persiguiendo así una eficiencia energética, ecológica y económica. Una técnica viable para utilizar es el reciclado en frío in situ del pavimento, utilizando el asfalto espumado como estabilizante. Dentro de las ventajas de este tipo de reciclado están las medioambientales, energéticas, económicas, entre otras; que serán discutidas en mayor profundidad más adelante.

El buen resultado de una rehabilitación mediante esta técnica depende fuertemente de los materiales presentes inicialmente (calidad y caracterización), y de una muy buena planificación de su construcción, ya que no se recomienda detener el proceso una vez iniciado.

El problema es que actualmente no existe una metodología para realizar este proceso en aeródromos, donde se indiquen qué estudios previos se deben llevar a cabo, los criterios a cumplir en el diseño estructural y de la mezcla, ni el proceso constructivo a seguir. Aquí radica la importancia de llevar a cabo este trabajo, pues si bien corresponde a un proyecto zonal, una

vez establecidos los criterios a seguir de acuerdo con las normas y experiencias internacionales, puede ser extrapolado a aeródromos en otras zonas del país abriendo paso al uso de material reciclado, con todos los beneficios que esto conlleva.

1.3 Objetivo General

Desarrollar una guía para la rehabilitación de estructuras de pavimentos flexibles en aeródromos de Aysén a través del reciclado en frío in situ utilizando asfalto espumado como estabilizante, en la cual se describan todos los procedimientos necesarios para llevar a cabo un adecuado diseño de mezcla y estructural.

1.4 Objetivos Específicos

- Detallar procedimientos previos al diseño, tales como estudios de tránsito aéreo actual y proyectado, ensayos de mecánica de suelos, clasificación de materiales, etc.
- Generar una metodología para el diseño de la mezcla que permita: 1) reconocer si es posible alcanzar una mezcla adecuada durante el proceso de reciclado a partir de información recogida, y 2) definir los criterios para obtener la proporción de asfalto, agua y cemento a utilizar.
- Generar una metodología para el diseño estructural del pavimento de un aeródromo, usando como base los criterios de la FAA y el método empírico mecanicista implementado a través del software MEPADS.
- Entregar una recomendación para la capa de rodadura, especificando qué tratamiento superficial utilizar.
- Entregar especificaciones técnicas para la construcción.

1.5 Alcances

Este trabajo está enfocado en pequeños aeródromos cuyas pistas estén compuestas por una base de material granular (más una subbase en algunos casos) y una capa de rodadura con tratamiento superficial (de cualquier tipo); y que se encuentren en la Región de Aysén.

Esta guía cubre el reciclado en frío in situ con asfalto espumado y se describirán los procedimientos previos a la ejecución, abarcando a grandes rasgos: estudio de antecedentes, ensayos de mecánica de suelos, diseño de la mezcla, diseño estructural del pavimento, recomendaciones para la capa de rodadura y consideraciones constructivas.

No se abordará la evaluación de otras técnicas de reciclado in situ de pavimentos, como puede ser la estabilización con emulsión asfáltica.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

Un pavimento flexible está expuesto a diversos factores que disminuyen su vida útil y, por lo tanto, son los que definen sus exigencias de diseño. Dentro de estos factores, los que producen los mayores deterioros son las condiciones ambientales, tales como cambios climáticos o presencia de agua en la estructura del pavimento, y las cargas de tráfico; siendo todos ellos responsables de la generación de grietas y deformaciones permanentes en la estructura.

Cuando un pavimento presenta deterioros, independiente del tipo de infraestructura, lo correcto es realizar mantenimientos o rehabilitaciones adecuadas a sus necesidades con el fin de preservar una buena condición y lograr cumplir (o incluso aumentar) la vida útil para la cual se diseñó. Dichas rehabilitaciones pueden ser superficiales o estructurales.

Las rehabilitaciones superficiales buscan solucionar problemas asociados al asfalto y sellos superficiales, los cuales son causados generalmente por el envejecimiento del betún asfáltico y el agrietamiento térmico. En pavimentos aeroportuarios, la resistencia al deslizamiento es un parámetro funcional importante ya que permite al piloto mantener el control sobre la dirección de la aeronave, pero puede verse afectada por el caucho adherido desde los neumáticos de las aeronaves y por el agua proveniente del ambiente. Algunos métodos para mejorar la resistencia al deslizamiento son: aplicar tratamientos superficiales (simple o lechada asfáltica), o remover contaminantes a través del microfresado y *waterblasting* (aplicar agua a alta presión).

Por otro lado, las rehabilitaciones estructurales son soluciones a largo plazo requeridas cuando la estructura y los materiales que componen el pavimento se han visto afectados, por lo que deben ser reemplazados. Este tipo de rehabilitaciones deberían enfocarse en sacar el máximo provecho al valor residual del pavimento existente, lo que podría implicar no perturbar el material que ya se encuentra densificado por la acción propia del tráfico. Algunos de los métodos utilizados son la reconstrucción total, construcción de capas adicionales y el reciclado profundo hasta encontrar el problema estructural, siendo común que distintos métodos se combinen en un mismo proyecto. En este trabajo se aborda el reciclado profundo utilizando asfalto espumado como estabilizante.

Sí es importante mencionar que la tasa de deterioro del pavimento se estima a partir de la calidad de la superficie de rodado, por tanto, conforme ésta se reduce, las rehabilitaciones deben ser mayores, al igual que sus costos. De aquí se deriva que la peor decisión en materia de gestión de pavimentos es no realizar ningún tipo de mantenimiento, ya que la tasa de deterioro aumenta exponencialmente en el tiempo.

2.2 Reciclado en frío

El hecho de que se pierdan condiciones estructurales o funcionales en la estructura del pavimento no significa que los materiales que la componen se hayan agotado completamente, pudiendo ser buenos candidatos para ser reciclados y utilizados en la misma u otras estructuras.

Una técnica de rehabilitación de pavimentos es la del reciclado en frío in situ con asfalto espumado.

El reciclado en frío es un tipo de rehabilitación estructural que puede ser llevada a cabo tanto en planta como en terreno y se trabaja a temperatura ambiente. En caso de realizarse en planta, el material extraído del pavimento se lleva a un depósito central donde se procesa con un mezclador continuo, por ejemplo; mientras que para realizarlo in situ es necesario el uso de una máquina recicladora móvil, como la mostrada en la Figura 2-1. Conforme la máquina avanza, las puntas dentro del tambor van rotando y pulverizando el pavimento, al mismo tiempo que se agrega agua proveniente de un tanque acoplado a la recicladora para alcanzar un contenido de humedad que permita conseguir altos niveles de compactación. El flujo de agua debe ser medido y controlado minuciosamente durante su añadidura. En el caso de estabilización con asfalto espumado, éste puede inyectarse a la cámara de mezclado a través de una barra aspersora.

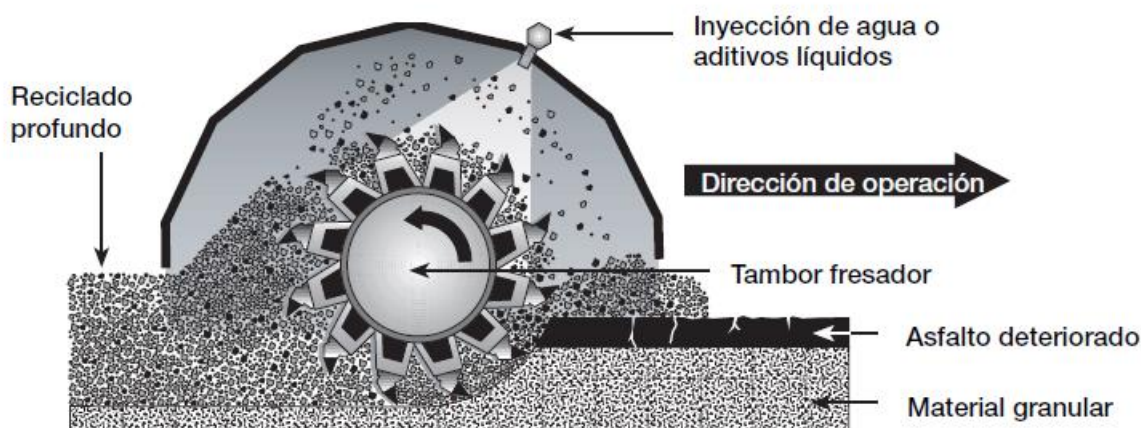


Figura 2-1: Proceso de reciclado dentro de la cámara/tambor. Wirtgen, 2004.

2.2.1 Tren de reciclaje

El reciclado in situ puede llevarse a cabo a través de dos procedimientos, designados como “tren de unidad simple” y “tren de unidades múltiples”. La diferencia radica en si los procesos de fresado e incorporación del ligante ocurren en la misma unidad o no. En el primer tipo se utiliza una máquina recicladora como la mostrada en la Figura 2-1, que se encarga de fresar el material a una profundidad variable y mezclarlo con los estabilizantes (emulsión, asfalto espumado o cemento). En cambio, en el tren de unidades múltiples, el fresado y procesamiento del RAP son completados por equipos distintos y el tren puede tener hasta 3 unidades: fresado, cribado/chancado y mezclador. Este trabajo se enfoca en el reciclado usando un tren de unidad simple.

Existen diferentes configuraciones de tren de reciclado, dependiendo de su aplicación y del agente estabilizador a utilizar, de todas formas, la máquina recicladora es siempre la que ejerce la tracción dentro del tren de reciclado.

En el reciclado con asfalto espumado, la máquina recicladora se conecta a un camión cisterna de betón y éste, a su vez, se conecta a un camión de suministro de agua, como se indica en la Figura 2-2. Delante de ellos debe espolvorearse el cemento (u otro filler activo) a través de un camión esparcidor o de algún sistema semi mecanizado que permita una distribución uniforme del filler sobre el pavimento.

Detrás de la recicladora pasa un compactador de rodillo vibratorio, una motoniveladora que profile la rasante y, por último, uno o dos compactadores que permitan alcanzar la densidad final requerida.



Figura 2-2: Tren de reciclado con asfalto espumado. Wirtgen, 2020.

2.2.2 Tipos de reciclado en frío

Dependiendo de las necesidades de la estructura a rehabilitar, pueden aplicarse distintas técnicas de reciclado en frío. Una primera clasificación separa las técnicas que usan agentes ligantes de las que no; luego, cada grupo puede subdividirse en función del tipo de tratamiento que recibe el material reciclado, que puede ser una modificación de las propiedades mecánicas, un rejuvenecimiento o estabilización con aditivos.

1. Reciclado en frío **SIN** agente ligante. En estos casos se recicla parte del pavimento, que puede ser asfalto y/o material granular, para luego agregar agua y compactar. Puede ser útil cuando exista una capa gruesa de mezcla asfáltica que presente agrietamiento severo, cuando el pavimento esté compuesto solo por material granular y necesite un reprocesamiento, o cuando la granulometría o plasticidad presenten deficiencias. Dentro de los tratamientos que recibe el material reciclado están la pulverización, el reprocesamiento y la adición de material granular para modificar las propiedades mecánicas.

2. Reciclado en frío **CON** agente ligante: En estos casos, al material reciclado se pueden agregar agentes químicos, emulsiones asfálticas, filler activos o asfalto espumado, dependiendo de lo que requiera el pavimento y otras condiciones del proyecto, como disponibilidad de material, presupuesto, etc. Cuando se busque estabilizar el material granular reciclado, una opción es adicionar asfalto espumado.

2.2.3 *Ventajas del reciclado en frío*

El reciclado en frío de pavimentos presenta varios beneficios asociados a distintos ámbitos de un proyecto, dentro de los cuales se encuentran:

- Factores medioambientales: Al utilizar el 100% de material reciclado, se disminuye la cantidad de escombros y el uso de botaderos; si además la granulometría es apropiada no se requerirán nuevos áridos, reduciendo su explotación. Conjuntamente, se reducen las emisiones de gases vehiculares, polución y contaminación acústica asociados al traslado de material hacia y desde el lugar de rehabilitación. Debido a las características de los procesos constructivos, también se reducen las emisiones de humo asociadas a altas temperaturas.
- Económicos: Se disminuyen los costos referentes al uso de botaderos y a la adquisición de nuevos áridos. También se reducen los costos por traslado de material.
- Calidad estructural de las capas recicladas: Gracias al control de los procesos a través de microprocesadores es posible dosificar de manera exacta la cantidad de agua y de agentes estabilizadores a añadir, con lo que se consigue una mezcla manejable y de alta calidad.
- Mejoras en la condición estructural y funcional: Se pueden eliminar las deformaciones y agrietamientos superficiales, además de destruir los patrones de agrietamiento del pavimento para que no exista reflexión de grietas. En el caso de reciclado profundo también se componen deficiencias estructurales. (Thenoux y García, 1999)
- Mantención del nivel de rasante: A diferencia de un recapado, el reciclado permite conservar el nivel de la rasante y con ello, la geometría y las pendientes originales del pavimento, por lo que no se afectan las condiciones de drenaje.
- Perturbación de la subrasante: El reciclado se realiza con solo una pasada de la maquinaria, de esta forma las subrasantes menos resistentes no se exponen a repetidos esfuerzos tensionales que pueden llevarlas a un levantamiento que amerite reemplazar con material granular. En el caso de subrasantes que ya estén consolidadas, compactadas y estables, tampoco es recomendable alterarlas ya que pueden perder su buena condición y resistencia.
- Tiempos de construcción: Debido a la productividad de las máquinas recicladoras es posible tener altos rendimientos en comparación con otras alternativas de rehabilitación. La disminución en los tiempos de ejecución se traduce también en menores costos y externalidades.
- Seguridad e impacto a los usuarios: El tren de reciclado en frío puede acomodarse en el ancho de una sola pista, sin intervenir la circulación vehicular en la otra pista que no está siendo reciclada.

Adicionalmente, el reciclado con asfalto espumado presenta algunas de las siguientes ventajas: (Wirtgen, 2004)

- Velocidad para apertura al tránsito: Una vez que el material ya fue compactado adquiere resistencia muy rápidamente, siendo posible abrir el tránsito inmediatamente.
- Flexibilidad: Al estabilizar el material con asfalto, se produce una base granular de propiedades viscoelásticas con una flexibilidad y resistencia mejoradas.
- Costo: La técnica de asfalto espumado utiliza un cemento asfáltico de penetración estándar que no presenta costos adicionales a su fabricación.

Algunas desventajas de esta técnica son:

- Dado que el asfalto debe estar caliente (sobre 160°C) es necesario contar con las instalaciones y medidas de seguridad adecuadas.
- La técnica está restringida a una granulometría específica con, al menos, 5% de material fino (que pase por el tamiz N°200). En caso de no cumplirse, deben agregarse áridos nuevos.

2.3 Fundamentos del Asfalto Espumado

La producción de asfalto espumado corresponde a un proceso físico de intercambio de calor, que busca llevar temporalmente al asfalto virgen a un estado de baja viscosidad.

Dentro de una cámara de expansión que contiene asfalto virgen caliente (160°C – 180°C) se inyecta una pequeña cantidad de agua fría y, en cuanto sus gotas entran en contacto con el asfalto, se produce un intercambio de energía calórica que aumenta la temperatura del agua hasta su punto de ebullición. Dado que la transferencia energética desde el asfalto es suficiente para superar el calor latente del agua, se genera vapor y las burbujas recién formadas son forzadas a fusionarse con el asfalto líquido bajo la presión de la cámara de expansión, creando burbujas de vapor de agua con una delgada película de asfalto soportada por la tensión superficial de éste. (Martucci, 2018)

Luego, a medida que la temperatura de la masa espumada disminuye, el vapor de las burbujas se condensa causando su colapso y la desintegración de la espuma, originando miles de gotitas de asfalto que comienzan a juntarse y a recuperar su volumen inicial. Si se incorpora el material granular cuando el asfalto se encuentra en su estado espumado, las gotitas de asfalto se adhieren a las partículas más finas del agregado (tamaño menor a 0.075 mm), recubriéndolas y produciendo una mezcla estabilizada con bitumen.

Este tipo de mezclas son denominadas BSM (*bitumen stabilised materials*) y la adición de ligante asfáltico se traduce en un aumento en la resistencia y una disminución en la susceptibilidad a la humedad; también se incrementa significativamente la cohesión, mientras que el ángulo de fricción se mantiene relativamente constante. Además, se agrega una pequeña cantidad de filler activo (cemento o cal) cuyas funciones son mejorar la resistencia retenida en condiciones de humedad, ayudar a la dispersión de asfalto entre los agregados, entre otras.

Dado que las gotas de asfalto no se juntan entre sí y las partículas más gruesas del agregado permanecen sin recubrimiento, la mezcla conserva las características granulares del material original, siendo entonces un material esfuerzo dependiente frente a esfuerzos de tracción. Asimismo, el contenido de vacíos de una capa compactada de BSM será similar al de una capa granular, no a una asfáltica, por lo tanto, las BSMs se mantienen granulares en su naturaleza y deben ser procesadas como tal (Asphalt Academy, 2009). La adición de asfalto permitirá que la mezcla adquiera características viscoelásticas, las cuales se verán aumentadas conforme se aumente el porcentaje de asfalto añadido.

La estructura interna de esta mezcla está compuesta por una masa de asfalto con partículas finas y filler, un esqueleto de agregados gruesos, y una porción de agregados finos sin recubrimiento asfáltico. Como se muestra en la siguiente figura, una parte de los agregados finos y de filler activo es cubierta por el asfalto en forma de espuma, que luego de desintegrarse queda en una fase residual creando “puntos de soldadura” dentro de la mezcla. Por otro lado, los huecos que quedan entre las partículas más gruesas son ocupados por agregados finos sin asfalto y vacíos de aire.

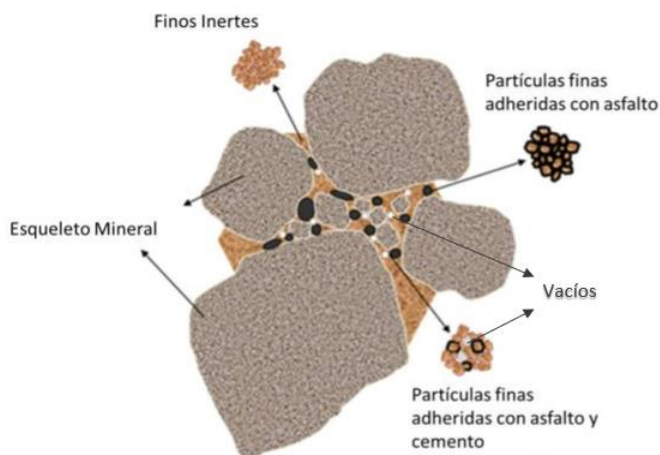


Figura 2-3: Microestructura de la mezcla con asfalto espumado. Paniagua et al, 2013.

Dado que el asfalto no cubre todos los agregados, como sí ocurre en una mezcla asfáltica en caliente, el material tratado con asfalto espumado no es negro a la vista, sino que es café. Un leve oscurecimiento del color del material posterior a la estabilización se debe a que las gotitas de asfalto generadas por el colapso de las burbujas se adhieren al filler, formando una especie de mortero entre las partículas más gruesas.

2.3.1 Materiales

Para llevar a cabo el reciclado con asfalto espumado es necesario que los materiales a utilizar cumplan con algunas características, que se describen a continuación:

2.3.1.1 Material granular

La tecnología de la estabilización con asfalto espumado es aplicable a una gran variedad de materiales como, por ejemplo: arenas, gravas o piedra chancada, que a su vez pueden ser de

origen virgen o reciclado. Un resultado satisfactorio de la estabilización dependerá, en parte, de que el material granular utilizado esté dentro de ciertos límites de tolerancia.

En el caso del reciclado, el material granular se produce por la pulverización del pavimento a través de la máquina recicladora y está compuesto por RAP, base granular y subbase, dependiendo de la profundidad del reciclado. Algunas de las características que se deben tener en cuenta son granulometría e índice de plasticidad.

En cuanto a la granulometría, la literatura establece que debe existir un porcentaje mínimo de finos que ronda el 5%, además de una banda granulométrica continua en el agregado de tamaño menor a 2 mm.

Cuando un material no tiene la cantidad suficiente de finos, el asfalto espumado no logra dispersarse correctamente y tiende a formar aglomeraciones de asfalto, conocidas como “filamentos”, cuyo tamaño varía según la escasez de finos. Por otro lado, cuando el porcentaje de finos es muy bajo los filamentos son más largos y actúan como lubricantes dentro de la mezcla, lo que afecta negativamente su resistencia y estabilidad (Wirtgen, 2004). En la siguiente figura se indican las recomendaciones vigentes para bandas granulométricas propuestas por: Guía TG2, Manual Wirtgen, Manual de Carreteras Vol. 5 y Austroads. Los valores que conforman las bandas mostradas se pueden encontrar en la sección ANEXOS.

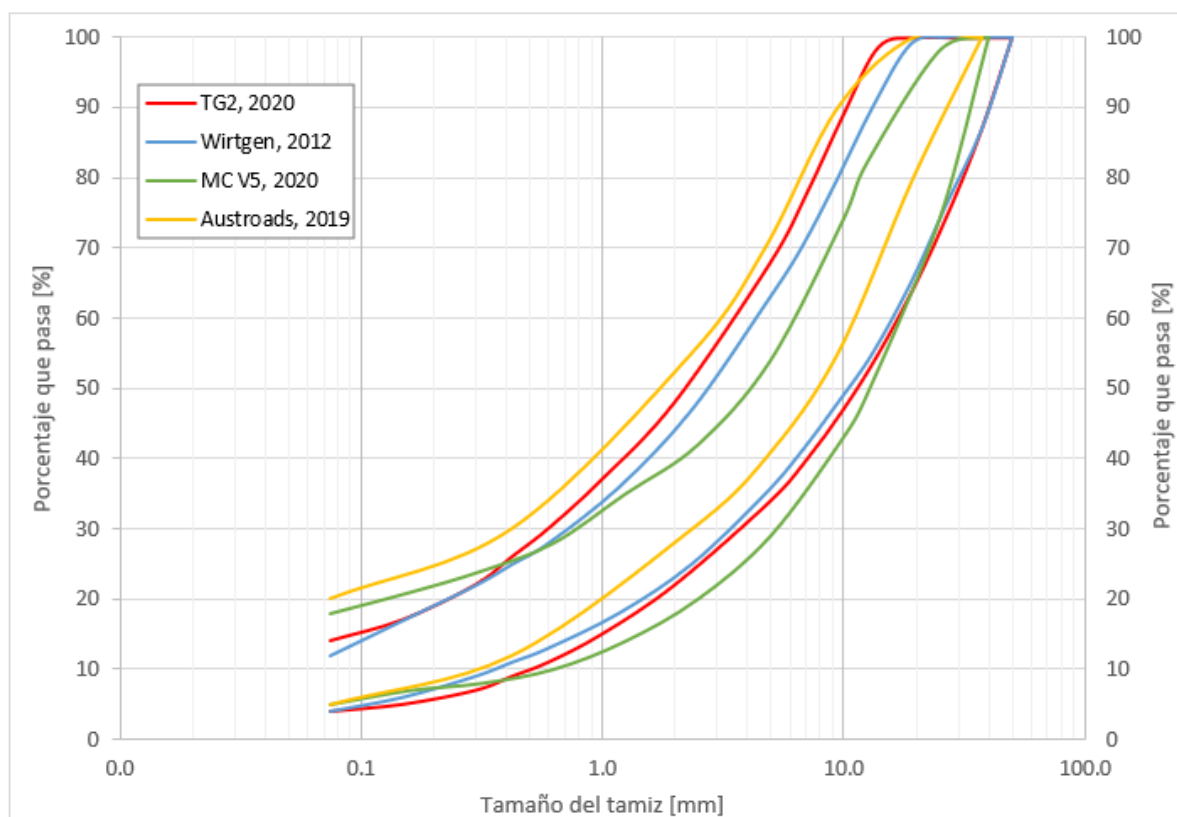


Figura 2-4: Bandas granulométricas para mezclas con AE. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, cada fuente bibliográfica propone una banda granulométrica distinta dependiendo de su experiencia e investigación, siendo el porcentaje mínimo de finos, el único punto en que prácticamente coinciden.

La deficiencia en el porcentaje de finos puede ser advertida con ensayos granulométricos simples, pudiendo corregirse con la importación de material con alto contenido de finos. Aquí se debe tener cuidado con los materiales cohesivos pues, debido a su naturaleza plástica, tienden a aglomerarse, lo que dificulta la dispersión del asfalto. Otra forma de mejorar esta deficiencia es a través de la adición de filler activo en que el 100% del material añadido pase por el tamiz N°200, aunque se debe tener en cuenta que el contenido de filler no puede exceder el 1.5% de la mezcla.

El objetivo es que la granulometría permita una cantidad mínima de vacíos en el agregado mineral, de esta forma se tendrá un material estabilizado con excelentes propiedades. Una recomendación para reducir los vacíos es obtener una granulometría continua para el agregado menor a 2 mm, esto facilita la compactación, lo que conlleva una menor susceptibilidad al ingreso de agua.

Otra propiedad que se debe controlar es el índice de plasticidad del material ya que es un indicador de la capacidad que tienen los finos para mezclarse con el asfalto espumado. De acuerdo con la guía TG2, los materiales a ser tratados con asfalto espumado deberían tener un índice de plasticidad menor o igual a 10, en caso de no cumplir, la adición de un filler ayuda a disminuirlo.

2.3.1.2 Filler activo – cemento

En estabilizaciones con asfalto espumado es común agregar pequeñas proporciones de algún tipo de filler activo a la mezcla, que puede ser cemento o cal. Este material contribuye a mejorar la dispersión del asfalto, aumentar la rigidez y resistencia, reducir la plasticidad de materiales plásticos y reducir la susceptibilidad a la humedad.

El comportamiento de una BSM con asfalto espumado varía significativamente dependiendo de las cantidades de bitumen y filler activo usadas. Su principal modo de falla es la deformación permanente, lo que puede mejorarse a través de la adición de un filler activo; sin embargo, un contenido excesivo de cemento llevará el material de un estado flexible a uno frágil, facilitando así la retracción y el agrietamiento por fatiga.

Cuando se utiliza una cantidad excesiva de cemento, la mezcla estabilizada se comporta más bien como un material tratado con cemento, y el beneficio de añadir bitumen es cuestionable. Por esto no se recomienda un contenido de cemento mayor al 1%, y la razón entre el bitumen y cemento añadidos siempre debe ser mayor a 1 (Asphalt Academy, 2009).

Cabe mencionar que las mezclas con asfalto espumado desarrollan resistencia cuando se evapora por completo el agua que contienen. Hasta que esto no ocurra el filler activo permite garantizar una resistencia mínima en la mezcla durante los días posteriores a la construcción, confirmando su importancia.

2.3.2 Propiedades de una BSM con asfalto espumado

La mezcla estabilizada con asfalto espumado puede describirse a través de dos parámetros físicos (o propiedades): qué tan grande es la espuma y cuánto tiempo se mantiene en el estado espumado. El objetivo en el diseño de mezcla es encontrar el contenido óptimo de asfalto y agua tal que se maximicen los parámetros.

2.3.2.1 Razón de expansión

La razón de expansión es una medida de la viscosidad de la espuma y determina qué tan bien se dispersa el bitumen dentro de la mezcla. Se calcula como la razón entre el volumen máximo de la espuma relativo al volumen original del bitumen.

La razón o tasa de expansión aumenta conforme se inyecta más agua al asfalto, ya que aumenta el tamaño de las burbujas creadas, como se indica en la Figura 2-5.

2.3.2.2 Vida media

La vida media es una medida de la estabilidad de la espuma y proporciona un indicador de su tasa de colapso durante el mezclado. Se calcula como el tiempo, medido en segundos, que tarda la espuma en colapsar hasta la mitad de su volumen máximo.

A diferencia de la razón de expansión, la vida media disminuye conforme se aumenta el contenido de agua (Figura 2-5). Esto se debe a que, al aumentar la cantidad de agua, las burbujas se hacen más grandes y, por ende, se reduce el espesor de la capa asfáltica que las contiene, haciéndolas más inestables. Además, las burbujas más grandes poseen una mayor área superficial expuesta a la temperatura ambiental, provocando que el vapor de agua disminuya su temperatura hasta alcanzar la condensación.

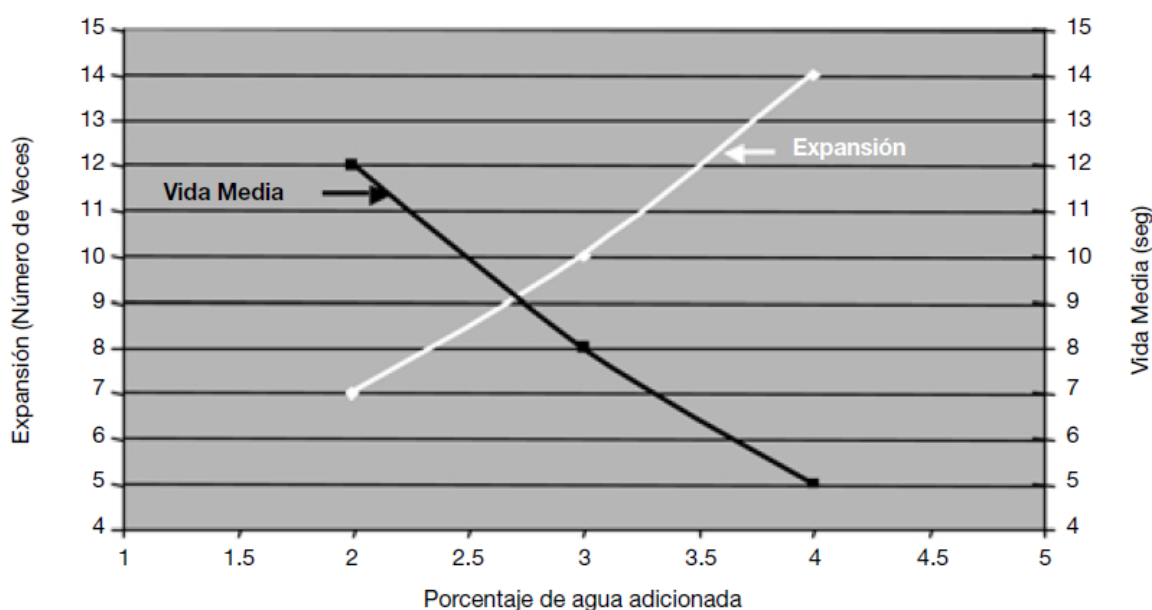


Figura 2-5: Relación entre propiedades de asfalto espumado y contenido de agua. Wirtgen, 2004.

El aumento de la temperatura y de los parámetros recién mencionados se relacionan con una espuma de mejor calidad, sin embargo, se considera que la “mejor espuma” es la que optimiza tanto la razón de expansión como la vida media. Es recomendable aumentar levemente el valor de vida media óptimo, aun cuando la razón de expansión disminuya.

No existen límites superiores para las propiedades de la espuma y el objetivo siempre debería apuntar a maximizar sus valores para asegurar una buena estabilidad. Lo que sí presenta problemas es una espuma de bajos parámetros, por lo que se han establecido límites mínimos aceptables para estabilizar un material:

- Razón de expansión: 10 veces
- Vida media: 8 segundos

El Manual de Carreteras establece que la vida media debe ser mayor a 5 segundos, sin embargo, tanto el manual Wirtgen como la guía TG2 indican que este valor debe ser mayor o igual a 8.

2.4 Diseño estructural de pavimentos aeroportuarios

El diseño estructural flexible consiste en determinar tanto el espesor completo del paquete estructural como el espesor de cada capa que lo compone. En el caso de pavimentos aeroportuarios, este es un problema complejo que involucra la interacción de múltiples variables.

Los pavimentos flexibles convencionales están compuestos por varias capas cuya función es distribuir las cargas de tránsito en mayores áreas conforme se avanza en profundidad; con esto se logra que la subrasante reciba cargas de menor magnitud, aunque distribuidas en áreas mayores (Figura 2-6). Dado que este trabajo está enfocado en pavimentos de este tipo (tratamiento superficial, base estabilizada, subbase y subrasante), no se abordará el diseño estructural de pavimentos rígidos.

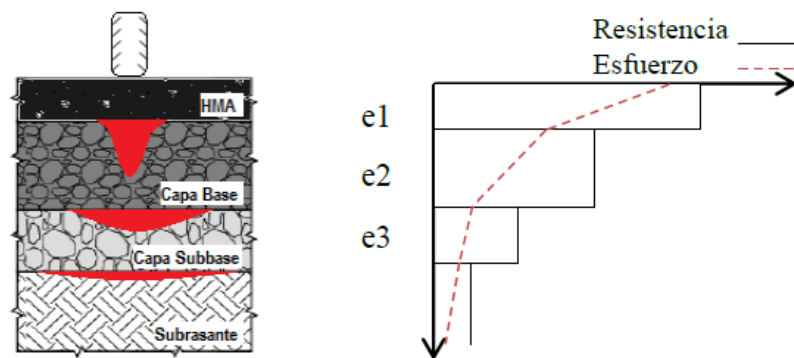


Figura 2-6: Comportamiento de pavimentos flexibles. Jara, 2019.

2.4.1 Vida del pavimento

Un concepto importante en el diseño estructural es la vida del pavimento, que se refiere a la vida estructural para diseño, y corresponde al número total de ciclos de carga que un pavimento soportará hasta el momento de su falla. Cabe destacar que la vida estructural difiere de la funcional, pues esta última hace referencia al periodo de tiempo durante el cual el pavimento es capaz de proporcionar un nivel de servicio aceptable cuando se miden parámetros como desechos de objetos extraños, resistencia al deslizamiento, o rugosidad.

Los pavimentos aeroportuarios se diseñan para cumplir una vida estructural finita dentro de límites de fatiga, por lo que, teóricamente se puede diseñar un pavimento para cualquier periodo de servicio. Sin embargo, para alcanzar la vida de diseño esperada, es necesaria una buena calidad de los materiales y la construcción, además de mantenimientos preventivos y/o rutinarios. Algunos de estos mantenimientos son: sellado de grietas, aplicación de sellos de pavimentos, rehabilitación de la superficie y renovación de propiedades antideslizantes.

Un periodo de diseño de 20 años es adecuado para pavimentos aeroportuarios.

2.4.2 Caracterización de una BSM con asfalto espumado

En el diseño estructural de pavimentos, los materiales que componen el paquete estructural se caracterizan a través de su módulo resiliente, que corresponde a una medida de la rigidez del material y está asociado a aplicaciones de cargas rápidas, a diferencia del módulo elástico (asociado a cargas lentas).

Una forma de obtener el módulo resiliente (M_R) es a través del ensayo dinámico triaxial, en el caso de probetas; aunque también es posible derivar su valor a partir de medidas de deflexión producidas por un deflectómetro de impacto.

En el caso de las mezclas estabilizadas con bitumen no se ha llegado a un consenso claro sobre su comportamiento y desempeño en el tiempo, a fin de establecer rangos para su módulo. Sin embargo, algunos autores han abordado el tema, experimentando con distintas composiciones de BSMs. Algunos de sus resultados se presentan a continuación.

2.4.2.1 Manual Wirtgen

Basándose en el método transitorio propuesto por la guía TG2, el manual Wirtgen postula que existen dos fases para la cual se debe diseñar el material: Fase de asentamiento (Fase 1) y Estado de régimen (Fase 2). Resultados de laboratorio indican que los valores de M_R para la modelación mecanicista deberían basarse en los resultados de los ensayos ITS y UCS, ambos efectuados a probetas de 150 mm con un contenido óptimo de humedad. Las ecuaciones que relacionan estos ensayos con el módulo resiliente son:

- Fase 1:

$$M_{R,1} = (\log(ITS_{equi}) \times 3950 - 7000) \times TSR \times F_{drenaje} \quad (1)$$

- Fase 2:

$$M_{R,2} = \frac{M_{R,1} \times TSR}{(0.5 \times UCS_{equi}) + 0.7} \quad (2)$$

Donde: $M_{R,i}$: módulo resiliente durante la Fase i [MPa]

ITS_{equi} : ITS a la condición de humedad de equilibrio [kPa]

TSR : resistencia a la tracción requerida

$F_{drenaje}$: factor de drenaje según Figura 2-7

UCS_{equi} : UCS a la humedad óptima [MPa]

Tabla 4.9 Factores de drenaje $F_{drenaje}$ para estimar rigideces de terreno de material estabilizado con asfalto				
Calidad de drenaje	Precipitación media anual (mm)			
	< 200	200 a 600	600 a 1000	> 1000
Muy buena	1.4	1.3	1.2	1.1
Buena	1.3	1.2	1.1	1.0
Normal	1.2	1.1	1.0	0.9
Mala	1.1	1.0	0.9	0.8
Muy mala	1.0	0.9	0.8	0.7

Figura 2-7: Factores de drenaje a considerar en el uso de la Ecuación 1. Wirtgen, 2004.

De acuerdo con el manual Wirtgen, una mezcla compuesta por piedra chancada y estabilizada con un 2.0% – 3.0% de asfalto espumado, debiese tener un módulo resiliente en el rango de 600-1500 MPa, una vez alcanzado su estado de régimen.

2.4.2.2 Halles, F.

En el año 2013, Halles estudió el mecanismo de evolución de la rigidez de mezclas recicladas y estabilizadas con bitumen y cemento. Para ello comparó mezclas estabilizadas con 3.0% de asfalto espumado y un 2.0% de distintos filler activos, y las sometió a un ensayo triaxial (Figura 2-8). Los resultados mostraron que, para cada mezcla, el módulo resiliente aumentaba cuando se sometía la probeta a mayores presiones de confinamiento. Además, la mezcla con 2% de cemento fue la que presentó mayores valores de M_R , estando en un rango entre los 900 y 1600 MPa.

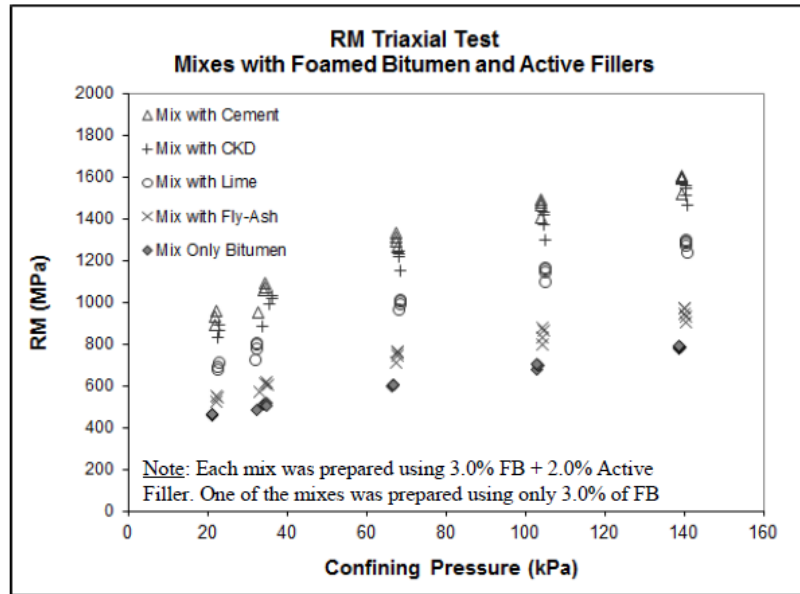


Figura 2-8: Resultados de M_r a través de ensayos triaxiales, para probetas curadas y mojadas. Halles, 2013.

2.4.2.3 Dal Ben, M

Un estudio realizado por Dal Ben en el año 2014, sobre la respuesta resiliente y el desempeño de BSMs con asfalto espumado incorporando material asfáltico reciclado, comparó mezclas con distintos porcentajes de RAP y observó sus propiedades mecánicas a través de distintos ensayos (Figura 2-9).

Las proporciones utilizadas en sus mezclas fueron: 100% RAP, 50% RAP + 50% G2, y 100% G2. Dal Ben realizó ensayos triaxiales a las probetas para distintas temperaturas, encontrando que a menor porcentaje de RAP se obtenían módulos resilientes mayores, por otro lado, para temperaturas menores, los M_R eran mayores para todas las mezclas. Al igual que Halles, Dal Ben también obtuvo mayores módulos cuando la presión de confinamiento era mayor.

Dal Ben también midió los módulos luego de 6 meses y observó que estos alcanzaban valores de 5000 – 6000 MPa en el caso de mezclas con 100% G2, es decir, 6 veces más altos que posterior al curado en laboratorio.

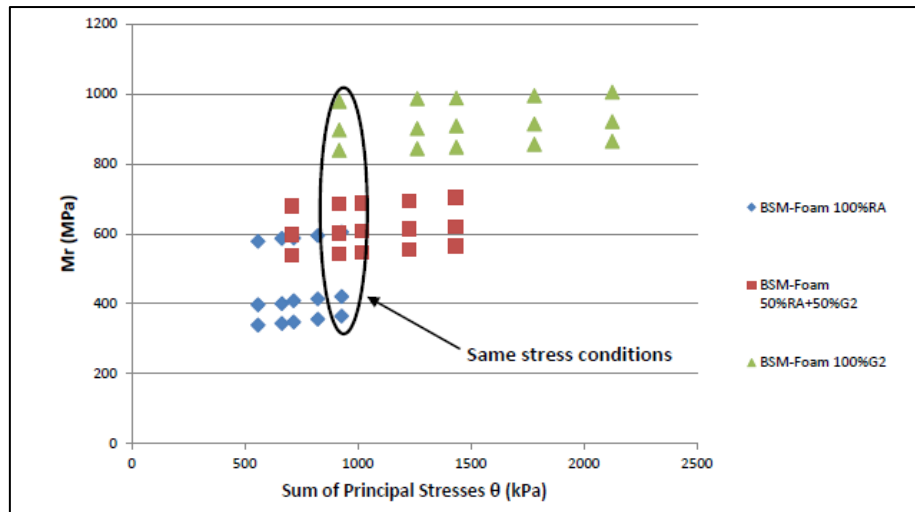


Figura 2-9: M_r de ensayos triaxiales con una presión constante de 200 kPa. Dal Ben, 2014.

2.4.2.4 Lynch, A & Jenkins, K.

En el año 2013, durante la conferencia de pavimentos flexibles organizada por la AAPA, estos autores presentaron un estudio de la capacidad de distribución de cargas en el largo plazo de materiales reciclados con asfalto espumado. Ellos concluyeron que el módulo aumenta a partir del tiempo de construcción de la capa; también encontraron que los valores de M_R son mayores cuando el ambiente es seco.

En el largo plazo, usando como indicador la rigidez, observaron que las capas de BSM tenían una capacidad de distribución de carga muy por encima a las capas granulares no ligadas, proporcionando así una mayor protección a la capa subyacente y a la subrasante.

2.4.2.5 Vasconcellos, F.

En el año 2015 Vasconcellos realizó una investigación similar a las anteriores y estudió el comportamiento mecánico y desempeño estructural de material reciclado y estabilizado con asfalto espumado, tanto en terreno como en laboratorio. El estudio en terreno se realizó a través de ensayos FWD en la autopista Ayrton Senna, en Sao Paulo; mientras que la evaluación en laboratorio se realizó a través del ensayo ITS, triaxial y de deformación permanente.

Para probetas de 200 x 100 mm, compuestas por 85% RAP y 15% de material granular, a través del ensayo triaxial obtuvo que el módulo resiliente variaba entre 740 – 1400 MPa. Esto concordaba con la evaluación en terreno con el ensayo FWD, a través del cual obtuvo un M_R de 960 MPa. En la Figura 2-10 se muestra un gráfico en escala logarítmica donde se observa que, si bien el módulo aumenta conforme crece la presión de confinamiento, no puede establecerse una relación clara del efecto del curado sobre el M_R .

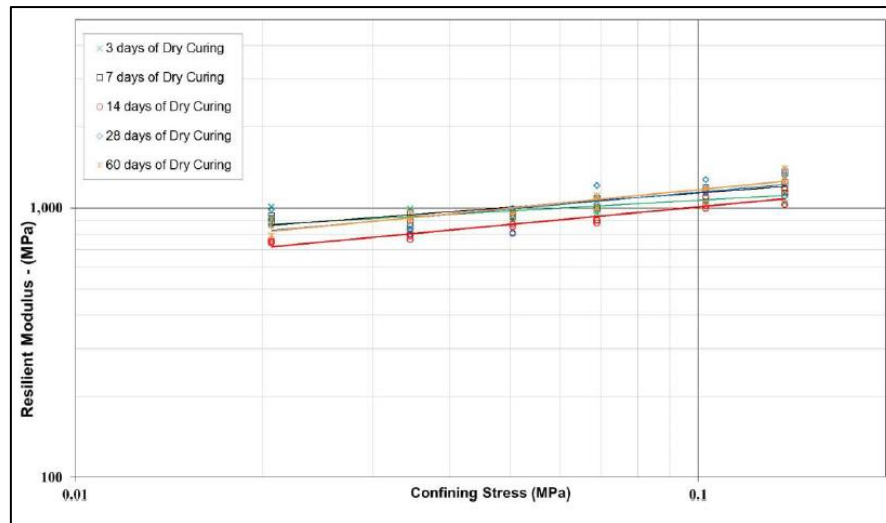


Figura 2-10: Mr de probetas curadas secas con diferentes periodos. Vasconcellos, 2015.

A partir de lo expuesto, los valores de módulo resiliente de acuerdo con cada fuente son:

Tabla 2-1: Rangos para Mr. Fuente: Elaboración propia

Autor	Mr mínimo (MPa)	Mr máximo (MPa)	Mr medio (MPa)
Wirtgen, 2004	600	1500	1050
Halles, 2013	900	1600	1250
Dal Ben, 2014	850	1000	925
Vasconcellos, 2015	1000	1450	1225

Con base en la Tabla 2-1, el diseño estructural se realizará considerando el promedio de los módulos presentado por los autores, teniendo un módulo resiliente de 1110 MPa. Una forma de obtener un M_R mayor es aumentando el contenido de filler activo, lo que conlleva una mayor resistencia, sin embargo, se debe considerar que al mismo tiempo la mezcla se rigidiza, lo que puede mermar su comportamiento.

2.4.3 Diseño FAARFIELD

Para cumplir con los objetivos del diseño estructural, la FAA ha publicado una serie de documentos, cuya más reciente versión es la circular AC 150/5320- 6F: “Diseño y Evaluación de Pavimentos Aeroportuarios”, donde entrega recomendaciones y guías para el diseño de este tipo de estructuras, las cuales se llevan a la práctica a través del software FAARFIELD. FAARFIELD es un programa computacional que utiliza la teoría de capas elásticas y el método de elementos finitos tridimensionales para diseñar pavimentos flexibles y rígidos, respectivamente. (FAA, 2016)

En pavimentos flexibles, el software utiliza la teoría de las capas elásticas para calcular los esfuerzos y deformaciones causados por los aviones. El proceso considera dos modos de fallas: la deformación vertical máxima en la parte superior de la subrasante, causando deformaciones

plásticas, y la deformación horizontal máxima en la parte inferior de las capas asfálticas, que trae consigo grietas importantes y la permeabilización de la capa asfáltica.

2.4.3.1 Factor de daño acumulado

Este programa utiliza las ecuaciones de fatiga para determinar cuándo un pavimento ha llegado a su límite estructural. La falla a la fatiga se expresa a través del Factor de Daño Acumulado (CDF, por sus iniciales en inglés) usando la regla de Miner, en donde se superpone la contribución de cada aeronave al daño acumulado en el pavimento, como se indica en la Ecuación 3.

El CDF representa la cantidad de vida de fatiga estructural que se ha utilizado, y se expresa como la relación entre las repeticiones de carga aplicada y las repeticiones de cargas admisibles, como se indica en la Ecuación 4. Mientras el valor de CDF sea menor a 1, significa que aún no se ha utilizado la totalidad de vida de fatiga del pavimento, quedando vida estructural remanente; si CDF fuese igual a 1, significa que el pavimento ya cumplió su vida estructural; de otra forma, si el CDF es mayor a 1, entonces el pavimento ha excedido su vida útil a la fatiga

$$CDF = \sum_i CDF_i \quad (3)$$

$$CDF = \frac{n^{\circ} \text{ repeticiones de carga aplicada}}{n^{\circ} \text{ repeticiones admisible}} \quad (4)$$

El cálculo de CDF a través de FAARFIELD se realiza por separado para cada aeronave que utiliza la estructura de pavimento, dejando obsoleto el concepto de avión de diseño, puesto que no es equivalente a considerar la combinación de todo el tráfico y tiende a arrojar espesores excesivos al utilizar este método.

2.4.3.2 Relación de pasadas a cobertura

Dado que un avión no viaja en una línea perfectamente recta a lo largo de la pista, es probable que se requieran varias pasadas de dicho avión para que una sección del pavimento reciba una aplicación de carga completa. La relación que existe entre el número de pasadas necesarias para aplicar una carga completa en un área unitaria del pavimento se expresa por la relación pasadas-cobertura (P/C), cuyo valor es siempre mayor a 1.

En el caso de pavimento flexibles, una cobertura ocurre cuando un área unitaria de pavimento experimenta la deformación máxima inducida por un avión, siendo entonces una medida del número de repeticiones de la deformación máxima en la parte superior de la subrasante. Las coberturas resultantes son particulares de cada avión, ya que dependen del número de pasadas, cantidad y espaciamiento de las ruedas en el tren de aterrizaje, ancho de área de contacto del neumático y distribución lateral de la trayectoria de las ruedas en relación con la línea central del pavimento o su demarcación.

FAARFIELD usa el concepto de ancho efectivo del neumático, el cual se define en la parte superior de la subrasante en el caso de pavimentos flexibles. Las líneas de respuesta se dibujan desde los bordes de la superficie de contacto pavimento-neumático, con una pendiente 1:2 hasta la parte superior de la subrasante, como se muestra en la Figura 2-11:

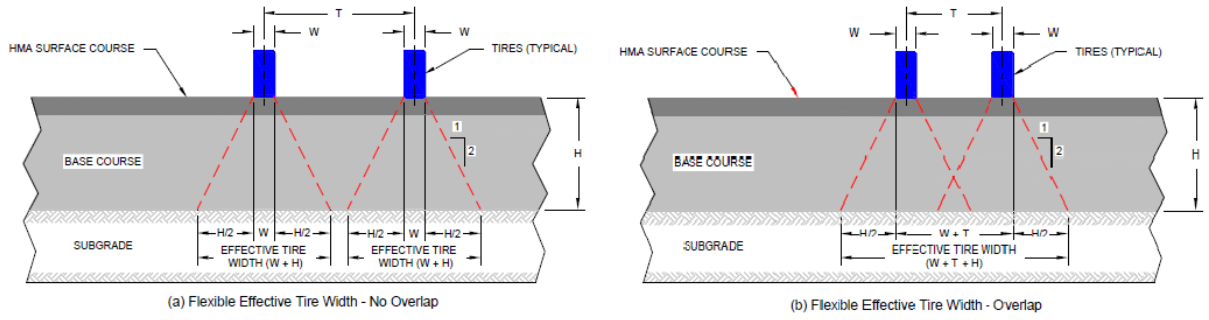


Figura 2-11: Ancho efectivo del neumático. FAA, 2016.

La configuración de ancho efectivo incide directamente en la distribución lateral de daño acumulado en relación al eje de la pista.

Ahora bien, la Ecuación 4 puede reescribirse de la siguiente forma:

$$CDF = \frac{\text{coberturas aplicadas}}{\text{coberturas admisibles}} \quad (5)$$

Luego, al incluir la relación P/C se tiene:

$$CDF = \frac{\text{despegues anuales} \times \text{años de diseño}}{\left(\frac{P}{C}\right) \times \text{coberturas admisibles}} \quad (6)$$

En el diseño de pavimentos nuevos, el software itera el espesor de la capa inmediatamente sobre la subrasante para que ésta tenga un CDF igual a 1. El modelo de falla que utiliza es:

$$\log_{10} C = \left(\frac{1}{-0.1638 + 185.19 \times \varepsilon_v} \right)^{0.60586}, \quad C > 1000 \text{ coberturas} \quad (7)$$

$$C = \left(\frac{0.004141}{\varepsilon_v} \right)^{8.1}, \quad C \leq 1000 \text{ coberturas} \quad (8)$$

Donde C = número de coberturas de carga

ε_v = deformación vertical en la parte superior de la subrasante

El nivel de tránsito de los aeródromos en que se enfoca este trabajo (y que será abordado más adelante) sugiere que el número de pasadas es menor a 1000 y, por ende, el número de coberturas de carga también lo será. Se desprende entonces que la ecuación que gobierna la fatiga de la subrasante es la Ecuación 8.

2.4.3.3 Elementos previos al diseño

Algunas de las variables que influyen en el diseño y que deben definirse son:

- Consideraciones de tráfico aéreo: En este punto es necesario considerar que el diseño debe realizarse para los pesos de despegue máximos de la flota que utiliza la pista. La

configuración del tren de aterrizaje define cómo se distribuirá el peso del avión sobre el pavimento, aunque se considera que el 95% de su peso es soportado por el tren principal y el 5%, por el tren de aterrizaje de la nariz. También se deben realizar predicciones sobre el volumen de operaciones y podría requerirse un análisis de sensibilidad que considere las aeronaves de uso estacional, pues pueden tener un impacto relevante en la estructura. El número de despegues anuales y su tasa de crecimiento anual esperada durante el periodo de diseño, puede ingresarse para cada tipo de aeronave a considerar.

- Caracterización de la subrasante: La clasificación de suelos con fines ingenieriles proporciona una indicación de la idoneidad del suelo como subrasante del pavimento; sin embargo, no entrega suficiente información para predecir el comportamiento del pavimento. Los materiales de la subrasante deben caracterizarse a través de una resistencia adecuada o un módulo y, en el caso de diseño de pavimentos flexibles con FAARFIELD, la mejor forma de hacerlo es a través del módulo elástico (E), el cual puede estimarse a partir del CBR usando la Ecuación 9:

$$E = 10 \times CBR \quad (9)$$

Donde:

CBR: Relación de soporte de California [%]

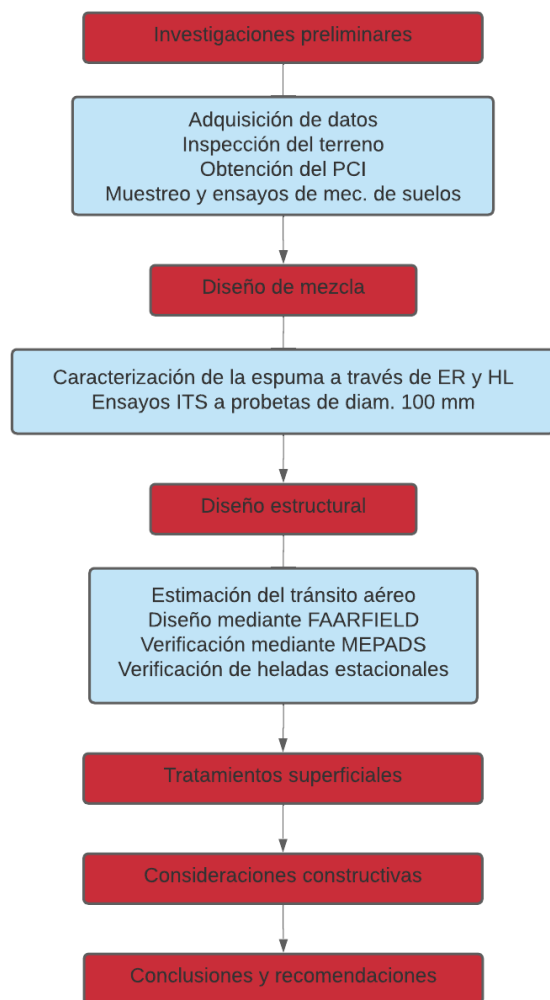
E: Módulo de elasticidad de la subrasante [MPa]

Generalmente se utiliza el valor de CBR en condición mojada o saturada, ya que arroja valores más conservadores.

- Estructura del pavimento: Antes de comenzar el proceso de iteraciones que lleva a cabo FAARFIELD, es necesario definir las capas del pavimento, indicando sus espesores y los materiales que la componen. Éstos se caracterizan a través de su módulo, que puede ser fijo o variable, y su razón de Poisson, cuyo valor es fijo para todos los materiales. La FAA ha especificado los materiales que se pueden asignar en la estructura. Cabe destacar que la base de material reciclado estabilizado con asfalto espumado no está definida propiamente tal, no obstante, existen dos opciones de materiales que pueden asignarse, según correspondan las propiedades de la mezcla; estos son “material estabilizado flexible variable” y “capa definida por el usuario”.

3 DESARROLLO

La estructura de esta guía de diseño comprende principalmente: una sección de evaluación estructural previa, una de diseño de mezcla y una de diseño estructural. Al final de la guía se entregarán recomendaciones para el tratamiento superficial que cubrirá la base estabilizada con asfalto espumado, junto con consideraciones constructivas. A continuación, se presenta un esquema de la estructura de esta guía:



Cuando se quiera desarrollar un proyecto de rehabilitación de pavimentos aeroportuarios, lo primero será realizar una evaluación estructural del pavimento. De acuerdo con lo establecido en la circular N°150/5320-6F de la FAA este proceso consiste en:

- Una investigación de la información histórica, condiciones climáticas y del tráfico aéreo
- Inspección del terreno
- Obtención del PCI
- Muestreo y ensayos

- Elaboración de un reporte de la evaluación

A continuación, se detallará cada una de las partes.

3.1 Investigaciones previas

Esta etapa consiste en recabar información con dos enfoques: mirando al pasado y al futuro. Por una parte, se recomienda obtener la mayor cantidad de información histórica sobre el pavimento, y por otra, se debe tener claro la vida de servicio que requiere el pavimento a reciclar y el estándar de propiedades funcionales que se esperan.

3.1.1 *Información histórica del pavimento*

El objetivo de contar con esta información es poder contextualizar el proyecto de buena manera, además de tener un panorama general del pavimento existente y de lo que se puede esperar de los estudios y ensayos posteriores. Lo ideal es lograr obtener la siguiente información a partir de registros disponibles:

- Diseño del pavimento especificado originalmente y el detalle de las capas que efectivamente fueron construidas.
- Detalle de los materiales utilizados en la construcción del pavimento (y en las rehabilitaciones, si las hubiese).
- Resultados del proceso de aseguramiento de calidad realizado durante la construcción.
- Fuente y calidad del material disponible en empréstitos locales.
- Datos históricos del tránsito aéreo, que incluya frecuencia y tipo de aviones que utilizan la pista.
- Registros meteorológicos, indicando si ha existido un cambio significativo en el clima desde la construcción del pavimento.

3.1.2 *Estimación del tráfico de diseño*

Generalmente la vida de servicio de un pavimento se mide en años y lo que se busca es darle al pavimento una capacidad estructural que le permita soportar un determinado número de ciclos de carga durante un periodo de tiempo sin que falle. Los pavimentos son diseñados para proporcionar una vida estructural finita ante los límites de fatiga de diseño.

Un factor importante al momento de obtener la capacidad estructural de una pista de aeródromo es el tráfico aéreo de diseño, a partir del cual debe ser posible desglosar la configuración de las aeronaves que utilizarán la pista, la presión de los neumáticos y las cargas por eje; también se debe conocer el volumen y distribución del tráfico en el futuro. Esta información debe conseguirse a través de los registros de las autoridades y de proyecciones estadísticas.

El análisis del tráfico cobra mayor importancia en proyectos de mediano y largo plazo (sobre 10 años de vida de servicio). Aun cuando no sea estrictamente necesario realizar este análisis en proyectos a corto plazo, sí es una buena herramienta para el diseño estructural y la planificación del trabajo a ejecutar. Cabe mencionar que en los proyectos financiados por la FAA los pavimentos tienen una vida estructural de 20 años y, por ende, los espesores arrojados

por el software FAARFIELD apuntan a cumplir este requerimiento a menos que se seleccione un periodo de tiempo distinto. De todas formas, este valor dependerá de los recursos y expectativas de la autoridad pertinente.

Además de la magnitud y caracterización del tráfico aéreo de diseño, otros factores que influyen en la capacidad estructural son: impacto del medioambiente, resistencia de la subrasante y calidad de los materiales que componen la estructura del pavimento (FAA, 2016).

La recomendación para pequeños aeródromos es recoger la información histórica de operaciones anuales y definir una tendencia representativa para extrapolar esos datos a 10 o 20 años. Paralelamente al número de operaciones, es importante desprender el tipo de aeronaves que utilizan la pista de manera regular.

3.2 Inspección del terreno

La visita a terreno tiene dos objetivos principales: advertir las condiciones del pavimento existente y examinar las condiciones y estructuras de drenaje. (FAA, 2016)

Para advertir las condiciones del pavimento existente es necesario identificar las secciones homogéneas dentro del proyecto, que presentarán una composición y comportamiento similar. Esto puede realizarse a través del método de las deflexiones y de una inspección visual. (Wirtgen, 2004)

3.2.1 Método de las deflexiones

Este método puede llevarse a cabo a través de dos ensayos no destructivos como el deflectómetro de impacto (FWD) (ASTM D4694), la viga Benkelman y el deflectómetro liviano (LWD) (ASTM E 2583). Todos ellos consisten en aplicar un pulso de carga sobre el pavimento y medir dos parámetros: la deflexión máxima justo debajo de la carga y el cuenco de deflexiones. Los resultados se exponen gráficamente indicando la deflexión acumulada en cada posición, en función de su ubicación o distancia al punto de referencia; luego, un cambio en la pendiente revela un cambio en el comportamiento y estructura del suelo, es decir, el comienzo de otra sección.

Dado que en la Región de Aysén no se cuenta con un FWD, una adecuada forma de obtener la capacidad estructural de las capas granulares es a través del deflectómetro liviano de impacto (LWD). Para estas mediciones se debe considerar lo siguiente:

- Procurar tener una superficie uniforme, pudiendo usarse una capa fina de arena que permita nivelar la superficie de contacto.
- El plato de carga a utilizar no debe ser muy pequeño ya que se buscan mediciones de flexión y no de corte, por lo que se recomienda usar un plato de diámetro no menor a 200 mm.
- Se recomienda modelar el pavimento a evaluar a través de un software de análisis que permita conocer las tensiones que soportan las capas granulares bajo las cargas esperadas. De este análisis se pueden desprender las tensiones a aplicar en el ensayo.

- Para que las mediciones sean confiables, en cada punto de evaluación deben realizarse al menos 6 golpes, donde sólo los últimos 3 se utilizarán para el cálculo del promedio del módulo.
- Se recomienda que el espaciamiento entre mediciones no sea mayor a 100 m, idealmente se sugiere un espaciamiento de 50 m.

3.2.2 Inspección visual

Se debe realizar caminando a lo largo de la sección a evaluar y tomando notas detalladas de los deterioros. También deben registrarse observaciones de las condiciones de drenaje y características geométricas. Luego, los deterioros reconocidos se clasifican en daño superficial, estructural o condición funcional, y se describen de acuerdo a su severidad, frecuencia y posición.

3.3 Obtención del PCI

El PCI (*pavement condition index*) es un índice numérico que le da una clasificación a la condición superficial del pavimento basada en la observación de los deterioros, entregando un indicador de su integridad estructural y de sus condiciones operacionales. El rango de valores de PCI va desde 100, para un pavimento en condiciones perfectas, hasta 0, para un pavimento en condición de falla total (sin vida útil remanente).

El PCI no puede medir la capacidad estructural del pavimento, ni tampoco determinar el coeficiente de fricción o la rugosidad general; sino que proporciona una base objetiva y racional para establecer las necesidades y prioridades de reparación y mantenimiento. Es una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de la condición de pavimentos aeroportuarios y el método de obtención está regulado por la norma ASTM D5340.

El método consiste en dividir el pavimento en componentes dependiendo de su uso, para luego dividirlos en secciones de acuerdo a características de diseño, construcción, tráfico, etc. Cada sección se divide en unidades de muestra, las cuales se inspeccionan visualmente para establecer el tipo y grado de severidad de los deterioros encontrados, además de su cantidad. Luego se calcula el PCI de cada unidad de muestra y, en base a estos valores, se calcula el PCI del pavimento completo. No es necesario inspeccionar todas las unidades de muestra, pero sí las necesarias tal de alcanzar una confiabilidad mayor o igual a 95% en el cálculo del PCI de la sección.

La finalidad de este procedimiento es ubicar al pavimento en una de las secciones mostradas en la Figura 3-1. Esta es una guía utilizada por la Dirección de Aeropuertos para evaluar las acciones de mantenimiento o rehabilitación a realizar.



Figura 3-1: Escala de PCI estándar y de aeropuertos. DAP, 2017.

3.4 Muestreo y ensayos

Una vez determinadas las secciones homogéneas a través de la inspección del terreno es necesario evaluar la estructura del pavimento existente en cada una de ellas, esto puede lograrse a través de la excavación de calicatas, extracción de testigos, ensayos de laboratorio y ensayo de cono de penetración dinámica (DCP) (Wirtgen, 2004).

El diseño de una mezcla BSM no solo requiere optimización en términos de características volumétricas y de compactación, sino que también requiere una completa consideración de las propiedades de ingeniería y durabilidad (TG2, 2009). Por consiguiente, es muy importante tener un control adecuado en la toma de muestras del material que será estabilizado, de lo contrario, se traduce en ensayos no representativos con resultados erróneos, lo que podría conllevar serias consecuencias al momento de ejecución. Los tres factores que se deben tener en consideración para la toma de muestras son:

1. Profundidad del reciclado. También se deben conocer las proporciones de cada capa in situ que conformará la capa estabilizada.
2. Variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente. Esto implica realizar suficientes diseños de mezclas hasta encontrar una mezcla óptima.
3. Preparación del material existente para la muestra. Lo más representativo es extraer el material de las muestras a través del fresado del pavimento.

El estudio de mecánica de suelos incluye ensayos de laboratorio estándar que permitan determinar la granulometría del material, relaciones de humedad-densidad, límites de Atterberg, entre otros.

3.4.1 Excavación de calicatas

Este proceso es uno de los más importantes en cualquier investigación de mecánica de suelos, por un lado, las calicatas permiten apreciar visualmente las capas y materiales que componen la estructura, y por otro, facilitan la extracción de material tanto para realizar ensayos de laboratorio, como para el proceso de diseño de mezcla. Se recomienda ubicar al menos una calicata en cada sección homogénea identificada anteriormente.

Se recomienda que sus dimensiones sean: 1.2 m de largo, 1 m de ancho y 50 cm de profundidad (o hasta el nivel de la subrasante). Las excavaciones deben ubicarse en la huella de los neumáticos a fin de obtener información representativa del pavimento y su estado. Deben realizarse al menos 3 calicatas en la pista a reciclar: una ubicada donde el deterioro sea evidente, otra ubicada en algún punto sin deterioro, y una tercera calicata ubicada en algún punto de condición promedio del pavimento.

La excavación se debe realizar cuidadosamente, apartando el material de cada capa por separado para luego ser muestreado. Conforme se avanza en profundidad se debe medir el grado de compactación in situ de cada capa a través de ensayos de densidad y ubicar el material de las muestras en contenedores cerrados para su medición de humedad en el laboratorio. Finalmente se registra el perfil del pavimento de acuerdo a la inspección visual (similar a la mostrada en la Figura 3-2), y muestras representativas son llevadas a laboratorio.

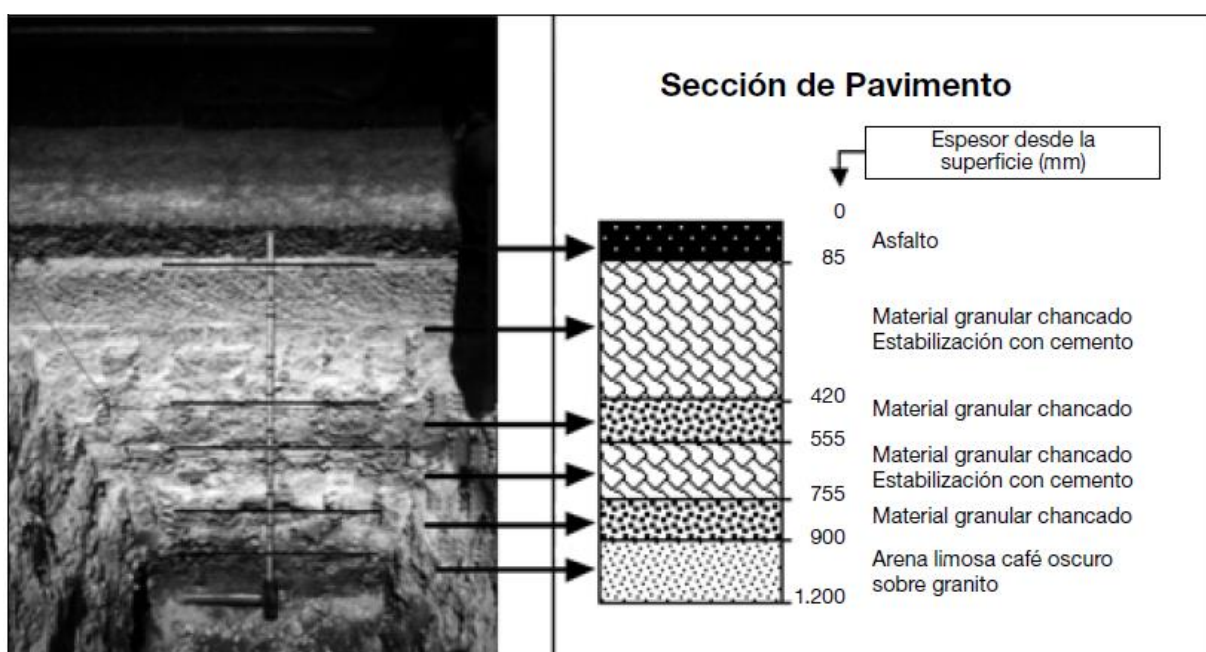


Figura 3-2: Excavación y sección típica de una calicata. Wirtgen, 2004.

3.4.2 Extracción de testigos

Los testigos permiten chequear los espesores de materiales ligados como asfalto y capas estabilizadas, siendo un proceso más preciso, rápido y menos destructivo que las calicatas. Los testigos también pueden ensayarse para conocer su composición volumétrica propiedades de ingeniería (Wirtgen, 2004).

Sin embargo, este método no es útil cuando se quiere muestrear materiales granulares. Dado que este trabajo se enfoca en aeródromos con tratamientos superficiales, cuyos espesores no son importantes, este método de muestreo no es aplicable. Sí se requerirá cuando se quiera realizar la conservación de un aeródromo con un pavimento robusto.

3.4.3 Ensayos de laboratorio

El objetivo de realizar estos ensayos es establecer la calidad de los materiales que componen la estructura del pavimento y que conformarán la nueva base estabilizada.

A continuación, se indican los ensayos correspondientes a un estudio exhaustivo del suelo, junto con su importancia.

- CBR saturado: al ser un ensayo en condición saturada, se prueba el componente de resistencia friccional de la resistencia al corte.
- Porcentaje que pasa el tamiz n°200 (finos): esto impacta en la densidad y capacidad de soporte que pueden alcanzarse. Se relaciona con el componente de fricción de la resistencia al corte. El rango ideal es 5-10% de finos.
- Densidad relativa: se relaciona con la densidad del empaquetamiento de partículas (volumen de vacíos) y, por lo tanto, con su potencial para desarrollar resistencia a la fricción.
- Ensayo de cono de penetración dinámica (DCP): es un indicador de la resistencia total in situ de las diferentes capas. Es sensible a la densidad, contenido de humedad, resistencia de las partículas, tamaño y plasticidad.
- Retro cálculo de rigidez con FWD o LWD: entrega una indicación directa (pero relativa) de la rigidez bajo cargas dinámicas para la mayoría de los materiales. Para pequeñas deformaciones, está correlacionado con el esfuerzo al corte.
- Índice de plasticidad (IP): obtenido a partir de los límites de Atterberg, determina la influencia del agua en la resistencia al corte. En general, la resistencia se reduce bastante conforme aumenta el IP.
- Contenido de humedad relativa: Se mide como la proporción entre la humedad medida y la óptima para el material. Indica el grado de saturación y de la resistencia cohesiva relativa.
- Módulo granulométrico: cuantifica la cantidad relativa de finos en el material y, por lo tanto, influencia su habilidad para desarrollar trabazón mecánica entre las partículas más gruesas.

3.5 Reporte de evaluación

La evaluación estructural del pavimento, junto con la caracterización de los materiales granulares, deberá culminar en un informe que identifique y ubique cada sección del pavimento, además de asignarle una capacidad de carga a cada una de ellas.

4 DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezclas estabilizadas con bitumen es particularmente desafiante debido a la alta variabilidad de los factores involucrados, donde cada material necesita ser procesado y mezclado para crear un nuevo material compuesto que cumpla funciones específicas. Este proceso consiste en llevar a cabo una serie de ensayos y procedimientos que permitan identificar una óptima formulación, mezclado y producción de una BSM. Para lograr esto es necesario que las muestras utilizadas sean representativas de los materiales y capas a estabilizar.

El diseño de mezcla involucra varios pasos y una serie de ensayos dependiendo de la magnitud del tráfico para el cual se diseñe. El primero de estos pasos, independiente del nivel de tránsito, corresponde a la evaluación del material a través de estudios preliminares, y busca establecer si es adecuado para ser estabilizado con asfalto. Esto fue abordado con anterioridad en la sección 3.4.3 Ensayos de laboratorio.

Dentro de la literatura que ha desarrollado el diseño de mezcla con asfalto espumado se puede encontrar la guía TG2 (versión 2009 y 2020), el manual Wirtgen (versión 2004 y 2012) y la guía de Austroads (versión 2019). Todas ellas se enfocan en pavimentos de caminos, por lo tanto, sus criterios de diseño están asociados a solicitudes medidas en ejes equivalentes (EE), pudiendo encontrarse límites en EE que definen las características que debiese tener la mezcla BSM. En el caso de pavimentos aeroportuarios es posible hacer una separación entre pequeños y grandes aeródromos a través de su número de operaciones anuales.

En adelante, se considerará como “pequeño aeródromo” a aquel que registre un máximo de 800 operaciones al año, pues analizando estadísticas que engloban gran parte de los aeródromos en la Región de Aysén, se observa que, superado el umbral de 800 operaciones, los aeródromos registran números mayores a 1500, pudiendo llegar hasta 6000. Otra característica importante es que los pequeños aeródromos son utilizados, en su gran mayoría, por aeronaves ligeras (pesos menores a 5800 kg) y no por aviones comerciales de mayor envergadura. Esto se aborda nuevamente en la sección 5.1 Composición del tránsito aéreo en la Región de Aysén.

4.1 Generalidades

Los materiales a estabilizar serán principalmente pavimentos de material granular, que podrían contener o no algún sello superficial de protección. Este material se mezcla con asfalto espumado para formar una base con el equilibrio necesario entre rigidez, resistencia al corte, flexibilidad y durabilidad.

En el caso de BSMs existen dos mecanismos de falla fundamentales para los cuales se debe diseñar la mezcla: deformación permanente y susceptibilidad a la humedad. Algunos de los factores que pueden mejorar la resistencia a estos deterioros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4-1: Acciones para mejorar resistencia a mecanismos de falla típicos de BSMs. TG2, 2020.

Deformación permanente	Susceptibilidad a la humedad
Mejorar angularidad, forma, dureza y rugosidad del agregado. Aumentar el tamaño máximo de partícula.	Trabajar con una granulometría continua y suave.
Agregar un contenido limitado de bitumen, no mayor al 3%.	Aumentar el contenido del bitumen, teniendo en cuenta su potencial para deformación permanente y los costos.
Agregar filler activo, limitado a un máximo de 1%.	Agregar filler activo, limitado a 1%.
Mejorar compactación.	Mejorar compactación
Reducir el contenido de humedad.	

De acuerdo con la experiencia de los investigadores Leek y Jameson (Austroads, 2011), los principales propósitos del diseño de mezcla son:

- Optimizar el desempeño del material y asegurar que éste cumpla los requerimientos mínimos de servicio durante el periodo de diseño.
- Proporcionar parámetros de los materiales para el diseño estructural.
- Minimizar costos y ahorrar en recursos no renovables mediante la optimización del uso de materiales y aditivos.

4.1.1 Materiales constituyentes

4.1.1.1 Agregado

La aplicación de un estabilizante bituminoso depende fuertemente de la granulometría del material pétreo. En la Figura 4-1 se indica la granulometría propuesta, que corresponde a la presentada por la nueva versión de la guía TG2 (2020), con una pequeña corrección en la cantidad mínima de finos requerida, dejando el mínimo exigido por el Manual de Carreteras (5%). Otra característica importante a cumplir es que el índice de plasticidad no debe ser mayor a 10.

Si es que el material granular a reciclar no cumpliera con alguna de estas características, deberá incorporarse una cantidad de agregado virgen tal que permita cumplir los límites mencionados.

También se debe considerar que la temperatura del agregado al momento de la estabilización influye de manera importante en la dispersión y propiedades de la mezcla (TG2, 2020). Al tener temperaturas más bajas, el tamaño de agregado mineral que logre ser cubierto por asfalto será menor, resultando esencial conocer las condiciones climáticas esperadas al momento de la ejecución. La temperatura mínima para realizar un reciclado con AE es de 10°C, y se

recomienda que el diseño de mezcla en laboratorio se lleve a cabo a la temperatura esperada en terreno, a fin de conseguir resultados confiables.

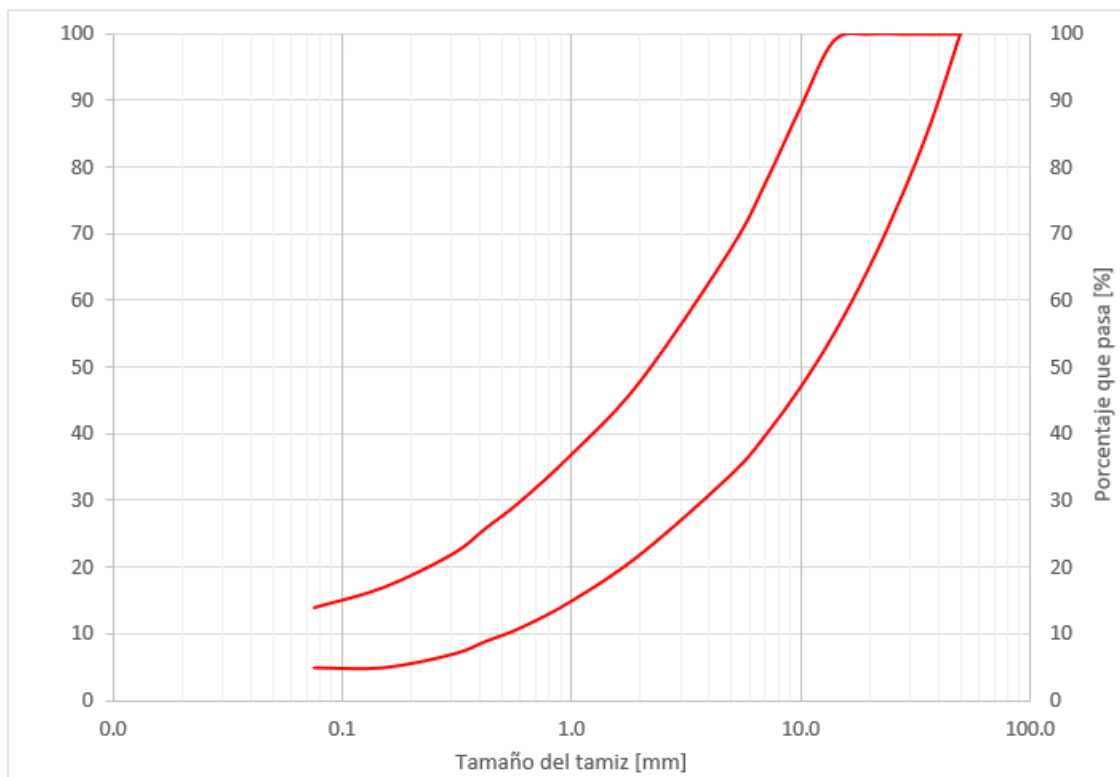


Figura 4-1: Granulometría ideal para BSM con asfalto espumado. Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2 Bitumen

El factor -probablemente- más importante de la técnica de reciclado con asfalto espumado es que el bitumen sea capaz de generar una espuma de buena calidad, esto es, con una razón de expansión y vida media lo más altas posible. Por lo tanto, en la elección del bitumen debe primar este criterio.

Considerando que en la región de Aysén se trabajará a temperaturas menores a 25°C, se recomienda que la espuma tenga las siguientes características mínimas:

- Razón de expansión: 10 veces
- Vida media: 8 segundos

Los factores que influyen en la calidad de la espuma son la proporción de agua inyectada dentro de la cámara de expansión y la temperatura del bitumen. Un incremento en la cantidad de agua dentro del bitumen caliente conduce a una mayor razón de expansión, pero también implica un decaimiento más rápido de la espuma, es decir, una vida media menor (Figura 4-2). El aumento de la temperatura generalmente se relaciona con espuma de mejor calidad.

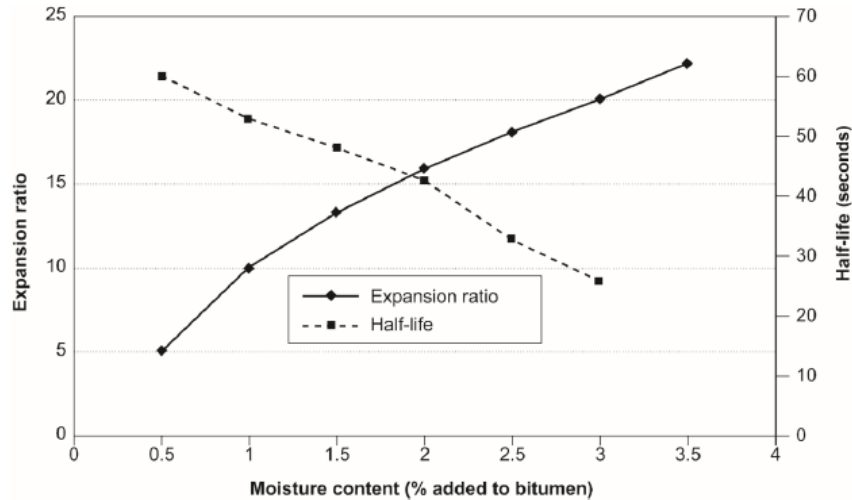


Figura 4-2: Efecto del agua en las características de la espuma. Austroads, 2019.

La razón de expansión (ER) y vida media (HL) deben medirse en el laboratorio para distintos contenidos de agua y a distintas temperaturas (al menos 3 valores entre 150°C-180°C). De esta forma es posible conocer el contenido de agua y la temperatura del bitumen que producen las mejores características de espuma.

De acuerdo con el Manual de Carreteras los tipos de betún aceptados para llevar a cabo esta técnica son CA-14 y CA-24. Ahora bien, tomando en cuenta nuevamente las temperaturas esperadas de trabajo, se recomienda usar el cemento asfáltico de menor viscosidad, es decir, el tipo CA-14.

Los asfaltos modificados pueden causar obstrucción en las líneas de conducción y boquilla de la máquina de espumado, dificultando la creación de una espuma constante que permita una adecuada dispersión del bitumen dentro de la mezcla. Por lo tanto, no se recomienda su uso en la técnica de reciclado con asfalto espumado.

4.1.1.3 Filler activo

A fin de mejorar la dispersión del bitumen en la mezcla, mejorar su adhesión al agregado, asegurar una resistencia inicial adecuada y reducir la susceptibilidad a la humedad del material estabilizado, se recomienda agregar filler activo siempre.

Para cumplir los objetivos recién mencionados sin convertir la mezcla en una rígida, se recomienda un contenido de cemento igual a 1%.

Es importante mencionar que la hidratación del cemento comienza inmediatamente al estar en contacto con algún material húmedo, pudiendo causar que las partículas finas se adhieran entre sí, lo que dificultará la dispersión del bitumen en la mezcla. Dicho esto, se recomienda que, tanto en el laboratorio como en terreno, se reduzca al mínimo el tiempo transcurrido entre la mezcla del cemento con el material y la aplicación del asfalto espumado.

4.2 Procedimiento de diseño de mezcla

El diseño de mezcla corresponde a un proceso que busca asegurar un desempeño confiable y determinar una composición costo efectiva de una mezcla. Los pasos involucrados, a grandes rasgos, se representan en el siguiente diagrama de flujo.

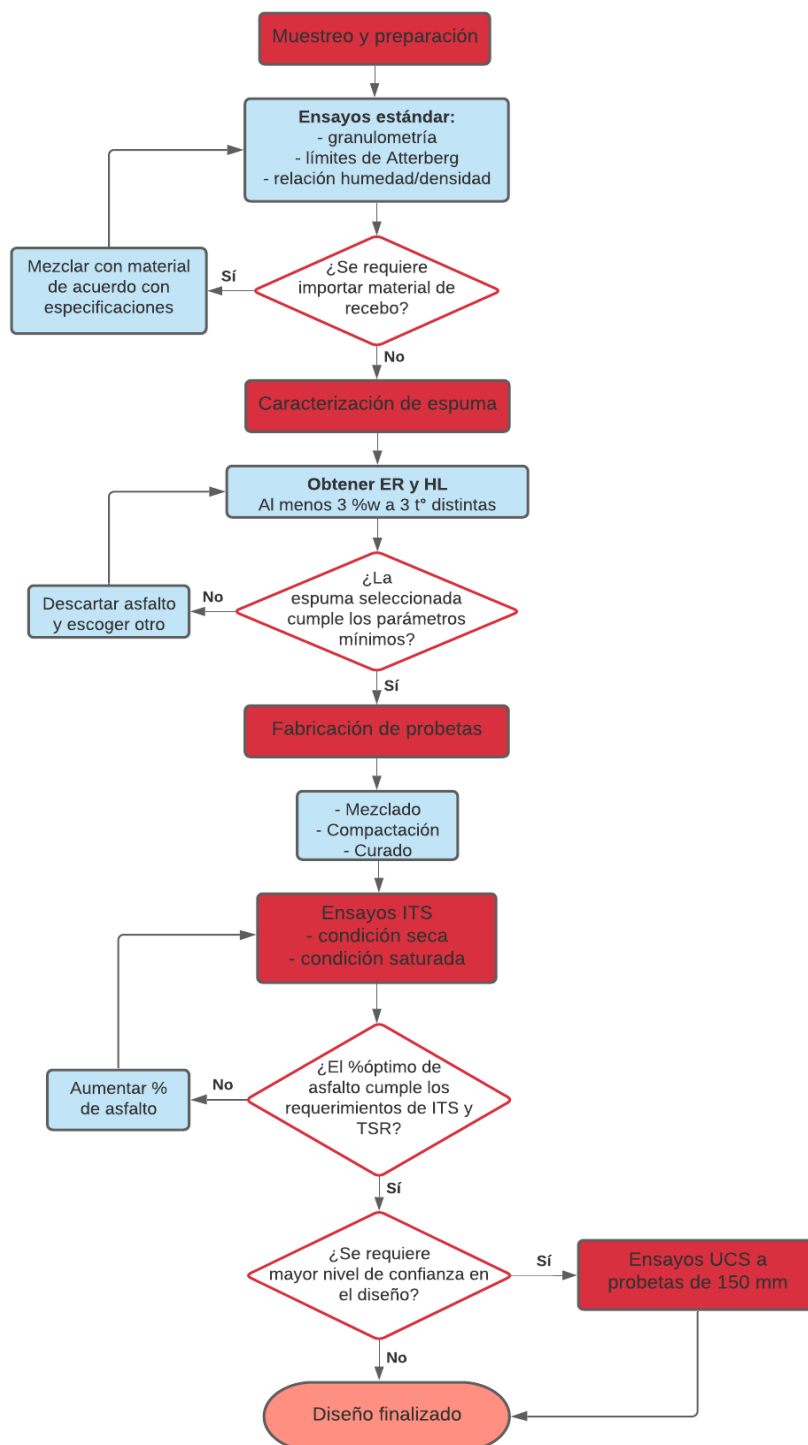


Figura 4-3: Proceso de diseño de mezcla para BSM con asfalto espumado. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Muestreo y preparación de muestras

Idealmente las muestras deben ser extraídas a partir del fresado del material mediante una máquina recicladora, para así simular de mejor manera el proceso de reciclado. Cuando esto no sea posible, las muestras se obtendrán de las calicatas excavadas durante la evaluación del terreno.

Posteriormente se deberán realizar ensayos estándar a la muestra de material a reciclar para conocer: granulometría (MC 8.102.1), límites de Atterberg e índice plástico (MC 8.102.3 y 8.102.4), relación humedad-densidad y densidad seca máxima (MC 8.102.7).

La banda granulométrica obtenida debe compararse con la presentada en la Figura 4-1, superponiendo ambas bandas en el mismo gráfico. Si la banda del material no cumple con la recomendada, será necesario importar material de recebo, el cual corresponderá a arenas rodadas, gravas o gravillas chancadas provenientes de empréstitos autorizados por el inspector fiscal del proyecto, y deberá cumplir con lo siguiente:

Tabla 4-2: Especificaciones para áridos de recebo. Fuente: MC Vol5, 2020.

Ensayo	Exigencia	Método MC
CBR	Mín. 60%	8.102.11
Partículas lajeadas	Máx. 15%	8.202.6
Partículas chancadas	Mín. 50%	8.202.6
Desgaste Los Ángeles	Máx. 30%	8.202.11
Equivalente de arena	Mín. 50%	8.202.9
Índice de plasticidad	NP	8.102.4

Posteriormente se prepara una muestra representativa. Para esto se dosifica el material disponible en las cuatro fracciones descritas en la Tabla 4-3 y se reconstituyen muestras de acuerdo con la granulometría ya obtenida. En dicha muestra deberá reemplazarse la porción de material de fracción 1 con material de la fracción 2.

Tabla 4-3: Separación de material por tamiz

Fracción	Mayor a	Menor a
1	19.0 mm	-
2	13.2 mm	19.0 mm
3	4.75 mm	13.2 mm
4	-	4.75 mm

Finalmente se deberá conocer el contenido de humedad higroscópico a través de la pérdida de masa de la muestra expresada como un porcentaje.

4.2.2 Características de la espuma

Las propiedades de espumación dependerán del contenido de agua añadido y de la temperatura del bitumen. Para encontrar las propiedades más adecuadas deberán producirse espumas con distintos contenidos de agua y a distintas temperaturas.

Se recomienda comenzar con una inyección del 2% de agua (respecto a la masa de asfalto), a una temperatura de 155 °C. Una vez formada la espuma se mide la altura máxima alcanzada dentro del recipiente y el tiempo transcurrido hasta que colapse a la mitad de su volumen máximo. Se repite esto tres veces y se registran los valores promedio de razón de expansión y vida media para ese contenido de agua y temperatura.

Luego, para la misma temperatura, se deben probar al menos otros dos contenidos de agua y registrar las propiedades de las espumas generadas. Este procedimiento se lleva a cabo para tres temperaturas diferentes, como mínimo (dentro del rango de 150 °C- 190 °C).

Una vez hecho esto, se elegirá la combinación % agua – t° que maximice las características de espumación, dándole una leve prioridad a la vida media por sobre la razón de expansión. Lo anterior se explica dado que la máquina recicladora usada en terreno trabaja a mayor potencia que los mezcladores de laboratorio, logrando mejorar la expansión del material, no así la vida media, ya que esta depende del contenido de agua. Cabe destacar que se utilizarán mezcladores del tipo pugmill de doble eje, como el mostrado en la Figura 4-4.



Figura 4-4: Mezclador de paleta de doble eje.

4.2.3 Fabricación de probetas

La fabricación de probetas se puede subdividir en tres pasos: mezclado, compactación y curado.

Para el mezclado, se coloca la cantidad de muestra necesaria dentro del mezclador pugmill junto con un 1% de cemento por masa seca de agregado y se añade aproximadamente el 75% del contenido de agua óptimo de compactación (OMC). Se mezcla hasta que esté uniforme, se añade

el asfalto espumado y se mezcla durante 30 segundos. Luego, se agrega la cantidad de agua restante para alcanzar el OMC y se vuelve a mezclar por 30 s.

Con la mezcla resultante se fabrican 6 probetas Marshall y se repite el procedimiento para al menos cuatro contenidos de asfalto distintos. Una opción es elegir un valor de referencia de contenido de asfalto de acuerdo con la Tabla 4-4 y usar las siguientes variaciones para los otros 3 contenidos a preparar:

- Contenido nominal – 0.4%
- Contenido nominal – 0.2%
- Contenido nominal + 0.2%

Tabla 4-4: Guía para estimar contenido nominal de bitumen. Fuente: TG2, 2020.

Fracción % que pasa el tamiz 0.075 mm	Contenido de bitumen (% por masa seca)	
	Fracción que pasa tamiz 4.75 mm	
	< 50%	> 50%
5 - 7	2.2	2.4
7 - 10	2.4	2.8
>10	2.6	3.0

La compactación se realiza mediante el compactador Marshall, aplicando 75 golpes en cada cara de la probeta y desmoldándolas 24 horas después. Todas las probetas deben curarse en un horno a 40 °C durante 72 horas y dejarse enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente se determina la densidad de cada probeta y deberán excluirse aquellas cuya densidad difiera del promedio en más de 50 [kg/m³].

4.2.4 Ensayos ITS

Para cada contenido de asfalto se ensayarán tres probetas a tracción indirecta (ITS) en condición seca y tres en condición saturada. Esto consiste en aplicar una deformación de 50.8 mm/min sobre el eje diametral de la probeta hasta provocar su ruptura. Si la falla no ocurriese en el eje axial de la probeta, ésta deberá ser eliminada.

Las probetas a ensayar en condición seca tendrán que ambientarse en una cámara a 25 °C durante al menos 1 hora. Por otro lado, las que se ensayen en condición saturada deben sumergirse en un baño de agua a 25 °C por 24 horas y luego, secarse superficialmente. Para realizar el ensayo se coloca la probeta en el aparato de carga centrando el pistón con el eje vertical de la probeta y se comienza a aplicar carga hasta conseguir su valor último. El valor ITS para cada probeta se calcula usando la siguiente ecuación:

$$ITS = \left(\frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \right) \times 10000 \quad (10)$$

Donde: *ITS* = Resistencia a tracción indirecta [kPa]

P = Carga máxima aplicada [kN]

h = Altura promedio de la probeta [cm]

d = Diámetro de la probeta [cm]

Finalmente, el valor ITS seco y saturado será el promedio de los tres valores obtenidos en su condición respectiva, aproximado a 1 kPa.

El contenido de asfalto óptimo será aquel que permita obtener el mayor valor de ITS saturado. Adicionalmente, deberá cumplir lo siguiente:

- ITS seco mayor o igual a 200 kPa
- ITS saturado mayor o igual a 150 kPa
- TSR mayor o igual a 75 %

El valor de TSR (resistencia a la tracción retenida) se obtiene de:

$$TSR = \left(\frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}} \right) \times 100 \quad (11)$$

Cabe mencionar que los límites de ITS saturado y TSR están relacionados con la ubicación geográfica de Aysén y, por ende, podrían ser menos conservadores si se tratase de una región al norte del país y que posea precipitaciones anuales menores a 40 mm (asociadas a un período de retorno de 10 años). Si este fuese el caso, debería priorizarse el valor de ITS seco por sobre el saturado.

4.2.5 Ensayo UCS

Cuando se requiera un mayor nivel de confianza en el diseño se recomienda realizar el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS) a probetas de 150 mm de diámetro. Para esto se prepararán 2 probetas con el porcentaje óptimo de asfalto determinado a través de los ensayos ITS, y con una compactación AASHTO del 100% obtenida mediante el compactador giratorio.

La resistencia a la compresión se calcula luego de medir la carga última de falla (P) de una probeta sometida a una razón de carga constante de 153 kN/min, a través de la siguiente ecuación:

$$UCS = \left(\frac{4 \times P}{\pi \times d^2} \right) \times 10,000 \quad (12)$$

Donde: UCS = Resistencia a la compresión no confinada [kPa]

P = Carga máxima aplicada [kN]

d = Diámetro de la probeta [cm]

La resistencia a la compresión será el promedio de las arrojadas por cada probeta. Este valor puede introducirse como parámetro de entrada en un software de modelación mecanicista.

Los pasos detallados del procedimiento descrito pueden encontrarse en los Anexos, en la sección 10.3 Procedimiento de diseño de mezcla.

4.2.6 Informe

El diseño de mezcla debe concluir con un informe donde se especifiquen claramente las características del material granular a reciclar (granulometría, índice de plasticidad, contenido de humedad), la dosificación de asfalto y agua para la espumación, la temperatura de reciclado, y el tipo y cantidad de filler activo a utilizar. También deben informarse los resultados de resistencia obtenida a través de ensayos ITS y UCS (en caso de haberse aplicado).

5 DISEÑO ESTRUCTURAL

Lo que se busca es lograr un diseño tipo de paquete estructural que sea capaz de soportar el tránsito aéreo de los pequeños aeródromos de Aysén. Este diseño debe ajustarse a las disposiciones de la FAA, para lo cual se utiliza el software FAARFIELD, además de incluir el resultado de utilizar material reciclado con asfalto espumado, lo que se modela a través del software MEPADS.

De manera adicional se realiza el diseño de paquete estructural con el método de CBR propuesto por la FAA, que considera el paso únicamente de aviones livianos (peso menor a 5895 kg). Cabe mencionar que esto tiene por objetivo una comparación de métodos y resultados, pero que no forma parte del diseño final al que se quiere llegar, esto debido a que el método está obsoleto.

5.1 Composición del tránsito aéreo en la Región de Aysén

En primer lugar, se determina el tránsito para el cual se diseñará el pavimento. Un estudio realizado por la DAP en el año 2013 buscaba establecer la capacidad operacional del aeródromo Puerto Marín Balmaceda, con el fin de diagnosticar el estado de la infraestructura de pequeños aeródromos. A partir de éste es posible extraer información sobre la flota de aeronaves que hace uso de las pistas de los aeródromos en la región.

En la siguiente tabla se indican las aeronaves con base en la región de Aysén y certificado de aeronavegabilidad vigente hasta el año 2013:

Tabla 5-1: Aeronaves civiles con base en la región de Aysén. DAP, 2013.

#	MATRICULA	MARCA	MODELO		PAX	MTOW (Kg)
1	C-56	PIPER	PA-31	Navajo	7	2950
2	CCI	BEECHCRAFT	E55	Baron	5	2410
3	CEZ	PIPER	PA-31	Navajo	7	3110
4	CPN	PIPER	PA-31	Navajo	7	2950
5	CRN	PIPER	PA-31	Navajo	6	2950
6	CRU	PIPER	PA23-250	Azteca	5	2360
7	CSE	PIPER	PA-31	Navajo	7	2950
8	CVX	PIPER	PA34-200T	Seneca	5	2080
9	CYM	PIPER	PA31-325	Navajo	7	2110
10	KIE	PIPER	PA28-236	cherokke / arrow	3	1360
11	KIU	PIPER	PA-31	Navajo	7	2950
12	KRH	PITTS	S-2A	biplano acrobático	1	710
14	MCA	PIPER	PA28-140	cherokke / arrow	1	880
15	MCB	CESSNA	150B		1	680
16	PRK	BEECHCRAFT	A36	Bonanza	5	1660
17	SNF	CESSNA	182D	Skyline	3	1180

De esto se desprende que el modelo más utilizado en la región es el PIPER PA-31, que además coincide con ser el de mayor peso máximo al momento del despegue (MTOW). Adicionalmente se cuenta con la información de las aeronaves con base en regiones cercanas, como son la Región de Los Lagos y la Región de Magallanes, la cual puede encontrarse en Anexos.

Al tomar en consideración que la zona posee actividad turística principalmente en época estival, se observa que los aeródromos presentan un mayor número de operaciones de aviones destinados al traslado de pasajeros. Las aeronaves que habitualmente operan en los aeródromos son:

Tabla 5-2: Aeronaves más frecuentes registradas en los aeródromos de Aysén. DAP, 2013.

#	MARCA	MODELO		PAX	MTOW (Kg)
1	BEECHCRAFT	E55	Baron	5	2410
2	CESSNA	402C		9	3110
3	CESSNA	208B	Gran Caravan	9	3970
4	CESSNA	172	Skyhawk	3	1110
5	DEHAVILLAND	DHC-6-300	Twin Otter	19	5680
6	PIPER	PA-31	Navajo	7	2950
7	PIPER	PA34-200T	Seneca	5	2080

De las anteriores, la aeronave que cobra mayor importancia debido a su masa es el modelo DHC-6-300, cuyo peso es de 5680 kg. El modelo que le sigue bajo este criterio es el 208B de CESSNA, con una masa de 3970 kg.

Se puede notar que todas las aeronaves autorizadas para operar en estos aeródromos tienen masas menores a 5890 kg (13000 lb). Por otro lado, el método de diseño de la FAA establece espesores mínimos tal que soporten holgadamente cargas mayores a 13000 lb, sin considerar el caso de aeronaves livianas. Dadas estas condiciones, se infiere que el método implementado a través de FAARFIELD no se ajusta a las características de este trabajo y, si quisiera utilizarse en un proyecto de esta envergadura, se debe tener presente que la carpeta estructural estará sobredimensionada, conllevando mayores costos de realización.

5.1.1 Estadísticas del tráfico aéreo

De acuerdo con datos provistos por la JAC, se construye la siguiente tabla:

Tabla 5-3: Operaciones anuales en principales aeródromos de Aysén. Fuente: Elaboración propia.

Nombre Aeródromo	Operaciones al año											
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
PUERTO AYSÉN	237	158	194	327	287	376	463	183	234	136	562	429
BALMACEDA	4589	3742	3756	3864	4405	4498	4890	5525	3358	3937	4951	4185
CHILE CHICO	68	88	127	121	73	49	47	81	119	319	764	572
TENIENTE VIDAL	2881	2927	3279	4271	5450	4779	2756	3052	2987	4294	4425	3681
COCHRANE	701	313	320	314	884	434	240	807	203	237	382	471
MELINKA	5505	5271	4760	5182	4801	4945	5350	5453	1459	1327	3966	5214

Se observa que, en general, la cantidad de operaciones va aumentando en el tiempo, aun cuando presenta oscilaciones para cada aeródromo. También se desprende que los datos no son homogéneos entre los distintos aeródromos, sino que hay algunos que presentan un número de operaciones 20 -y más- veces mayores a otros. Para aeródromos que superen un promedio de 3000 operaciones anuales, se recomienda un diseño estructural de acuerdo a lo especificado por la FAA.

Además, a partir de información entregada por la DAP sobre las operaciones de los pequeños aeródromos de la región, se construye el siguiente gráfico que permite visualizar de mejor manera la variación de actividad en el tiempo.

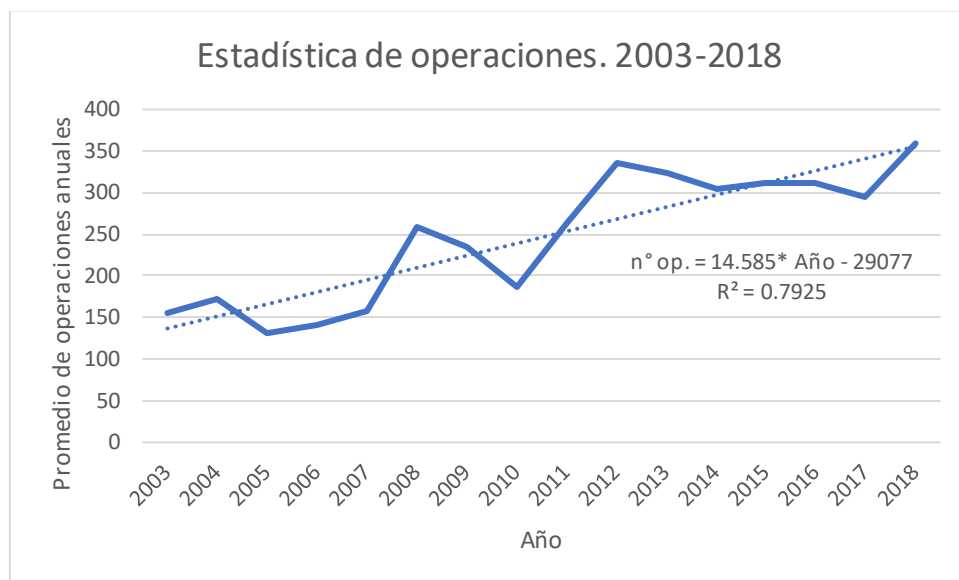


Figura 5-1: Estadísticas de operaciones en aeródromos de la región de Aysén. Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar que durante un periodo de 15 años se ha duplicado la cantidad de operaciones en pequeños aeródromos y si bien existen variaciones en mayor o menor medida, el aumento es sostenido en el tiempo, presentando un incremento total de 132%. Al mismo tiempo, la curva indica un nuevo salto en el año 2018, lo que hace suponer que la tendencia al crecimiento podría extenderse. El aumento promedio anual fue de un 8.9%. Extrapolando estos datos a 20 años (año 2028) se obtiene que el número de operaciones promedio para pequeños aeródromos es de 647.

Es importante destacar que, además de las aeronaves ya mencionadas, debe considerarse el paso de un avión de emergencia. Para esto se incluye el avión Hércules C-130 dentro de la flota, con una frecuencia de 1 operación anual.

5.1.2 Procedimiento de diseño

A través del software FAARFIELD se diseña una estructura de pavimento que cumpla con un CDF <1 para las aeronaves que frecuentan la zona. Esto se realiza considerando una base de material granular con un módulo representativo de una BSM, pues el programa no permite incluir el material específico. Luego, este diseño se verifica a través del software MEPADS, en

el cual se modela la base como material estabilizado con asfalto espumado. A continuación, se presenta un diagrama de flujo del proceso de diseño.

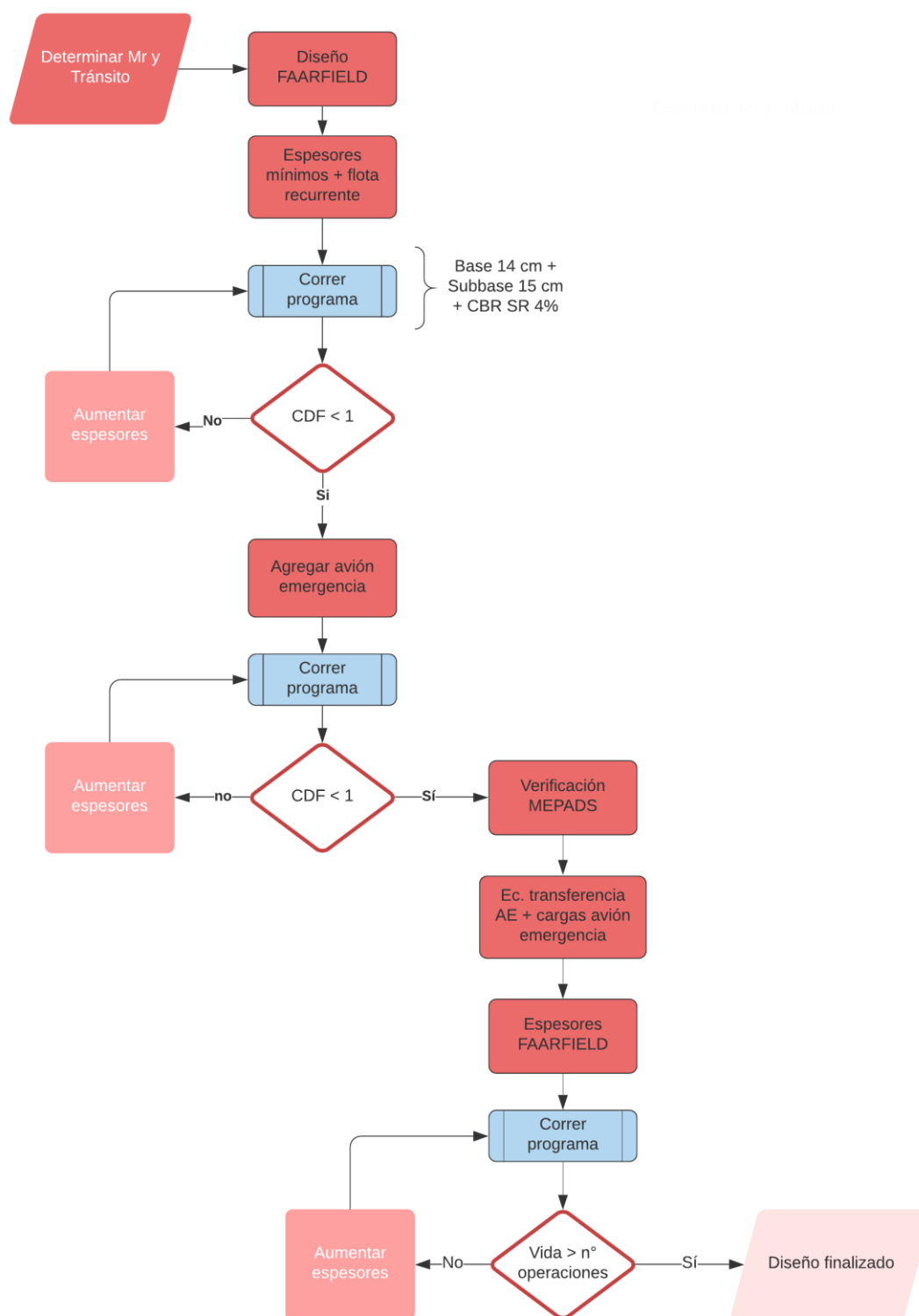


Figura 5-2: Proceso de diseño estructural para pavimentos de aeródromos. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Aplicación del método FAARFIELD

En primer lugar, se define la estructura preliminar del pavimento, la cual está compuesta por dos capas granulares de espesores mínimos y una subrasante de CBR 4%, como se muestra en la figura. Cabe destacar que la capa “user defined” representa una BSM sólo a través de su módulo, ya que no se están considerando las ecuaciones de transferencia propias del asfalto espumado, ni sus propiedades viscoelásticas.

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
User Defined	130.0	1,110.00
P-154 UnCr Ag	150.0	275.79
Subgrade	CBR = 4.0	41.37

Non-Standard Structure

Total thickness to the top of the subgrade, t = 280.0 mm

Figura 5-3: Diseño preliminar en FAARFIELD.

Posteriormente, se establece la flota de aviones que harán uso de la pista de acuerdo con lo presentado en el apartado 5.1 Composición del tránsito aéreo en la Región de Aysén. A partir de varias iteraciones se observó que las aeronaves con pesos menores a 2000 kg no tenían ningún efecto sobre el CDF acumulado de la estructura, por esto, se consideran únicamente los aviones con pesos mayores a este umbral. Además, a cada uno se le asignó un total de despegues anuales igual a 155 para el año 0, con una tasa de crecimiento del 9%. Con ello el número de despegues totales es de 5890.

Airplane Name (8)	Annual Departures	% Annual Growth	Total Departures
Aztec-D	155	9.00	5,890
Baron-E-55	155	9.00	5,890
Navajo-C	155	9.00	5,890
Seneca-II	155	9.00	5,890
GmCaravan-CE-208B	155	9.00	5,890
S-10	155	9.00	5,890
S-12.5	155	9.00	5,890
C-130-57	0	-5.00	0

Figura 5-4: Flota de aviones registrada, con proyección anual de crecimiento estimada.

Bajo estas condiciones se obtiene un CDF igual a 0, es decir, no se genera un daño acumulado en el pavimento.

Luego, al solicitar al software que diseñe la estructura, éste arroja un espesor de subbase igual a 102 mm, consiguiendo un CDF de tan solo 0.19, quedando la estructura de la siguiente manera:

Ej1 NewFlexib~01 Des. Life = 20

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
User Defined	130.0	1,110.00
Non-Standard Structure		
P-154 UnCr Ag	101.6	65.93
Subgrade	CBR = 4.0	41.37

N = 2; Subgrade CDF = 0.19; t = 231.6 mm

Figura 5-5: Espesores optimizados por el software.

Airplane Name (8)	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
Aztec-D	0.00	0.00	4.94
Baron-E-55	0.00	0.00	5.06
Navajo-C	0.00	0.00	5.08
Seneca-II	0.00	0.00	5.27
GmCaravan-CE-208B	0.00	0.00	4.91
S-10	0.00	0.00	4.40
S-12.5	0.19	0.19	4.17

Figura 5-6: Contribución de la flota de aeronaves al valor de CDF.

En la tabla de resultados se observa que el CDF se debe al paso de solo una aeronave, correspondiente al modelo DHC-6-300 (S-12.5). A través de la Ecuación 6 es posible obtener el número de coberturas admisibles para esta configuración de capas y cargas:

$$C_{adm} = 7,755$$

Por otro lado, a partir del valor de la relación P/C para esta aeronave, se obtiene la cantidad de coberturas de carga asociadas al valor de CDF:

$$C_{aplicadas} = 3,645$$

Con este valor y aplicando la Ecuación 8 es posible calcular la deformación unitaria en la subrasante, obteniendo:

$$\varepsilon_p = 0.001548$$

Dado que el pavimento diseñado preliminarmente no presenta problemas para soportar la carga de las aeronaves livianas, se procede a evaluar su comportamiento con el paso de un avión de emergencia. Variando levemente los espesores, ahora se incluye el paso del avión militar Hércules C-130, asignándole un peso de 42.2 ton y un único despegue anual, con una tasa de crecimiento de -5%, ya que este avión es utilizado solo en casos de emergencia. Con ello se tiene lo siguiente:

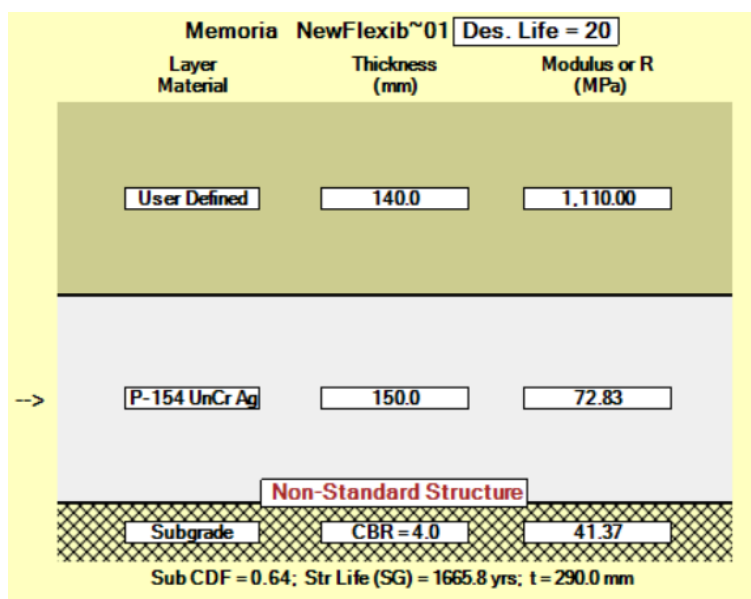


Figura 5-7: Diseño preliminar del pavimento para el paso de un avión Hércules C-130.

Y con la siguiente flota:

Airplane Name (8)	Gross Taxi Weight (tns)	Annual Departures	% Annual Growth
Aztec-D	2.360	500	9.00
Baron-E-55	2.410	500	9.00
Navajo-C	2.950	500	9.00
Seneca-II	2.080	500	9.00
GmCaravan-CE-2	3.970	500	9.00
S-10	3.112	500	9.00
S-12.5	5.680	500	9.00
C-130-57	42.200	1	-5.00

Figura 5-8: Aumento de la exigencia en las cargas de aeronaves.

Los resultados de daño acumulado son los siguientes:

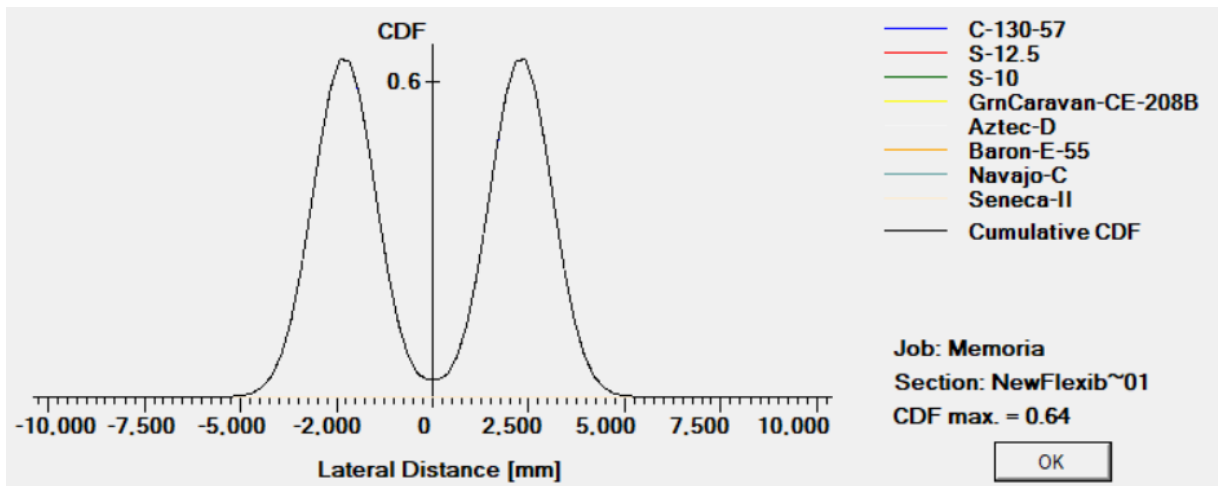


Figura 5-9: Representación de las zonas que presentan mayor daño estructural dado los espesores y flota mencionados.

Se observa que el daño estructural se debe sólo al paso del avión de emergencia, aun cuando se triplicó la cantidad de operaciones anuales de las aeronaves livianas. Además, dado que al pavimento le resta vida útil, se solicitó al software diseñar el espesor de la estructura, resultando lo siguiente:

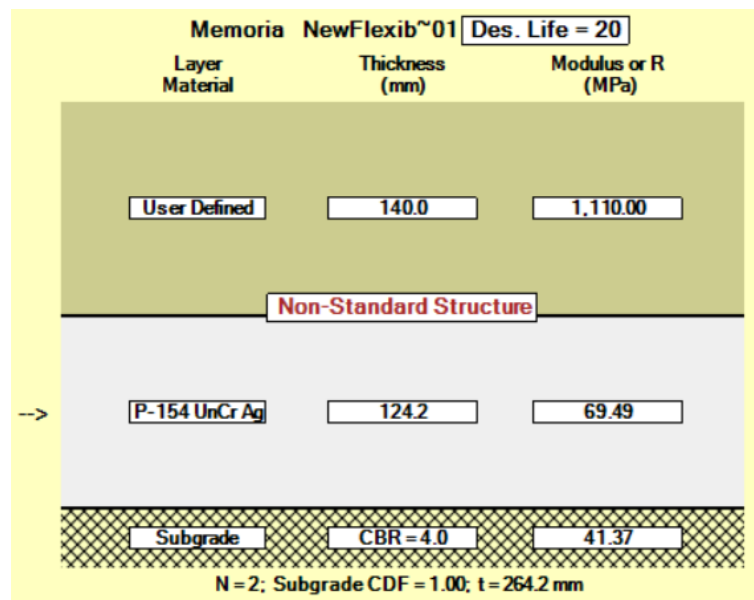


Figura 5-10: Diseño estructural por FAARFIELD para la flota mencionada.

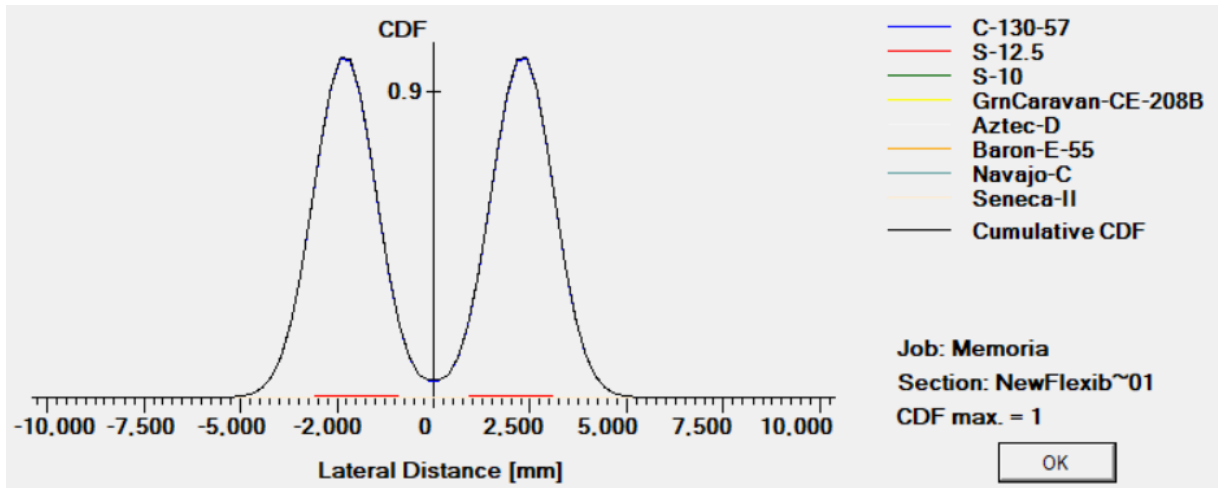


Figura 5-11: Curva de daño acumulado para el diseño propuesto por FAARFIELD.

El CDF obtenido se debe únicamente al paso del avión Hércules C-130.

Este paquete contempla 14 cm de BSM sobre una subbase de material granular de 12.5 cm. Para dar mayor holgura al diseño y facilitar la construcción, se seguirá trabajando con una subbase de 15 cm, como la mostrada en la Figura 5-7. Dado que esta técnica considera rehabilitar pavimentos existentes, es importante verificar que éstos necesitarán un espesor total mínimo de 29 cm. En caso de tener espesores mayores, el paquete estructural final tendrá una mayor capacidad a la considerada, resultando favorable para su desempeño.

5.2 Verificación MEPADS

Este software fue desarrollado en base al método sudafricano de diseño empírico mecanicista y evalúa la estructura del pavimento de acuerdo con la teoría de capas elásticas. El diseño se realiza de manera iterativa para distintas configuraciones de estructura del pavimento, es decir, una vez propuestos los espesores de las capas y haber definido las cargas, se corre el programa y se evalúa la vida estructural de la capa (número de repeticiones que soporta). Si esta vida estructural es menor a lo requerido, entonces se modifica la estructura del pavimento, ya sea en materiales como en espesor.

En cuanto a los materiales, el programa ofrece capas superficiales (asfáltica y cementada), materiales cementados, distintos tipos de capas granulares (G1-G6), subrasante, entre otros. A cada uno de ellos se le puede asignar un valor de módulo elástico y de Poisson. También es posible modificar el valor de deformación de ruptura, el cual se utiliza en las ecuaciones de fatiga con las que trabaja el programa.

De acuerdo con el Manual Wirtgen la ecuación de fatiga para la mezcla con asfalto espumado es:

$$N_f = 10^{[c - 0.708(\varepsilon/\varepsilon_b)]} \quad (13)$$

$$\log(N_f) = c - 0.708(\varepsilon/\varepsilon_b) \quad (14)$$

La ecuación 14 tiene la misma estructura que la ecuación que utiliza el programa, por lo que, para modelar una capa de BSM con asfalto espumado, es necesario definir el intercepto y pendiente de la ecuación. Como se observa, la pendiente corresponde a 0.708; mientras que el intercepto es 6.339. El valor del intercepto depende de la categoría del camino, pero se ha decidido dejar el valor fijo correspondiente a una categoría A. Por último, el valor de ε_b es la deformación unitaria de ruptura, el cual se define en 172, de acuerdo con el manual.

Stiffness reduction phase

$$\log N_{eff} = I - S \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right) - offset$$

Material code	Intercept	Slope	Offsets			
			50%	80%	90%	95%
C1 to ETB	6.339	0.708	0.15	0.57	0.71	0.84

Figura 5-12: Parametrización de ecuación de fatiga para asfalto espumado.

A continuación, se muestran los trenes de aterrizaje de los principales aviones implicados en el diseño anterior:

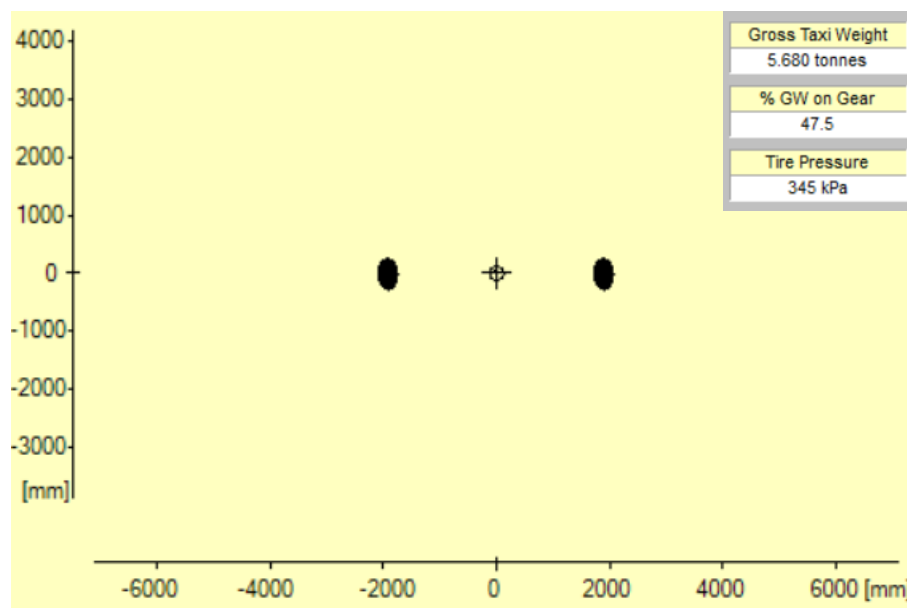


Figura 5-13: Puntos de apoyo de aeronaves livianas.

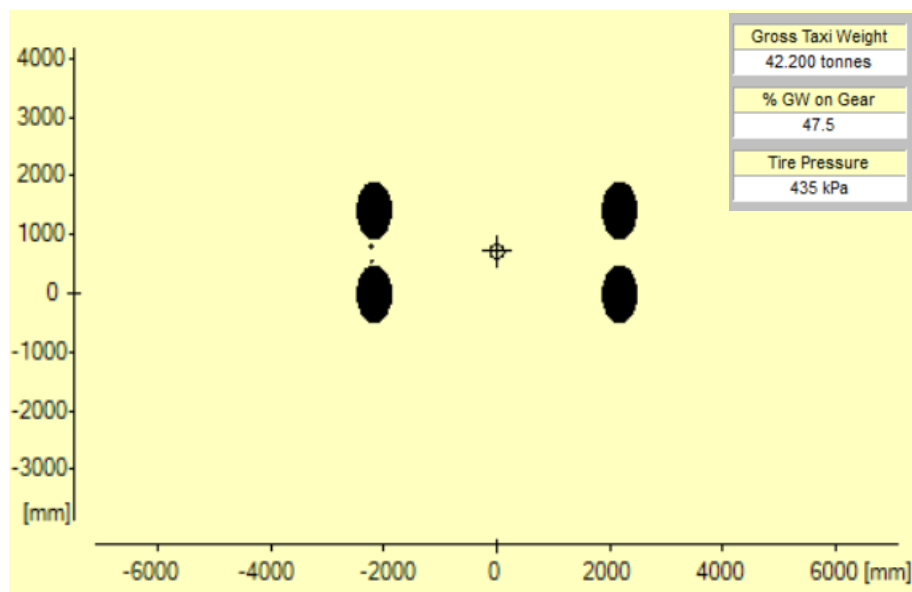


Figura 5-14: Puntos de apoyo del avión Hércules C-130.

En primer lugar, se definen los espesores del paquete estructural a evaluar. Los espesores utilizados corresponden a los aplicados en FAARFIELD.

Number of Layers: Number of Phases:

Phase 1			
Material	Thickness	E-Modulus	Poisson's Ratio
ETB	140	1110	0.35
EG6	150	66	0.35
Soil	0	41	0.35

Figura 5-15: Espesores y características del pavimento a verificar.

Para definir las cargas que se aplican es necesario escoger el tipo de eje que se utiliza y establecer la carga (kN) y la presión de los neumáticos. En general las ruedas de los aviones considerados trabajan a presiones de 58 psi aproximadamente (400 kPa).

Para determinar la carga de diseño se tomó en consideración que la masa de la aeronave es de 42.2 toneladas y que, además, los criterios de diseño de la FAA indican que el 95% del peso del avión se lo lleva el tren de aterrizaje principal y el otro 5%, por el tren de la nariz. De esta forma se tiene que la masa de diseño es de 40.09 ton aproximadamente, correspondiendo a 393.15 kN. Luego, al dividir dicha carga en los cuatro neumáticos del tren de aterrizaje, se tiene que cada una de ellas aplica 98.25 kN sobre el pavimento.

Load definition

No of loads: 4

Single Load (kN) Pressure Radius X Y

98.25	435	268.131	-2171.7	0
98.25	435	268.131	2171.7	0
98.25	435	268.131	-2171.7	1447.8
98.25	435	268.131	2171.7	1447.8

Figura 5-16: Distribución de cargas de un avión de emergencia.

Una vez realizadas estas configuraciones, se procede a correr el programa y se obtiene que la capa de base estabilizada con asfalto espumado soporta un total de 147 repeticiones de carga asociadas al avión C-130.

Percentile
95%

Layer	Phase Life	Residual after Phase 1	Phase Life	Equivalence Factor	Residual bef. Phase	Residual after Phase 2	Phase3 Life	Equivalence Factor	Residual bef. Phase	Layer Life	Cemented Life
ETB	147.583	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	147.583	
EG6	55497.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	55497.	
Soil	22.5726	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	22.5726	

Figura 5-17: Resultados obtenidos de fatiga provocada por un avión de emergencia.

Las respuestas máximas para la capa BSM y la subrasante son:

Tabla 5-4: Esfuerzos y deformaciones máximas debido al paso de un avión de emergencia.

Capa	Profundidad mm	Respuesta	Valor
BSM	0	σ_{zz} [kPa]	-434
	0	ϵ_{tt} μ strain	-862
	140	ϵ_{tt} μ strain	834.7
SR	290	σ_{zz} [kPa]	-135
	290	ϵ_{tt} μ strain	-3124

En el caso del avión DHC-6-300, cuya masa es de 5680 kg, cada rueda aplicará una fuerza de 27.85 kN con una presión de 345 kPa. Verificando el paso de este avión sobre la pista de aterrizaje se llega a que la capa BSM tiene una vida útil de 6567 repeticiones y que la deformación máxima al fondo de la capa es de 434.3 μ strain.

Percentile											
95%											
Layer	Phase Life	Residual after Phase 1	Phase Life	Equivalence Factor	Residual bef. Phase	Residual after Phase 2	Phase3 Life	Equivalence Factor	Residual bef. Phase	Layer Life	Cemented Life
ETB	6567.43	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	6567.43	
EG6	4.0898e+006	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	4.0898e+006	
Soil	590367	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	590367	

Figura 5-18: Resultados de fatiga provocada por el paso del DHC-6-300.

Cabe recordar que, de acuerdo con la información de tránsito aéreo recabada, al cabo de 20 años, el número de operaciones promedio para los aeródromos de Aysén es de 5890, por lo que la capa BSM cumple con el tránsito proyectado.

5.3 Heladas estacionales

Las condiciones que deben existir simultáneamente para una acción perjudicial de las heladas son:

1. el suelo debe ser susceptible a las heladas;
2. la temperatura de congelamiento debe penetrar en este suelo susceptible;
3. la humedad libre debe estar en cantidades suficientes para formar lentes de hielo.

La FAA ha desarrollado relaciones empíricas que correlacionan la clasificación del suelo con el grado de susceptibilidad, categorizándolos en cuatro grupos, yendo del menos susceptible al más susceptible.

Grupo de congelamiento	Tipo de suelo	Porcentaje en peso de finos menores a 0,02mm	Clasificación del suelo
FG-1	Gravas	3 a 10	GW, GP, GW-GM, GP-GM
FG-2	Gravas Arenas	10 a 20 3 a 5	GM, GW-GM, GP-GM SW, SP, SM, SW-SM, SP-SM
FG-3	Gravas Arenas, excepto arenas limosas muy finas Arcillas, IP mayor a 12	Más de 20 Más de 15 -	GM, GC SM, SC CL, CH
FG-4	Arenas limosas muy finas Todos los limos Arcillas, IP = 12 o menor Arcillas estratificadas y otros sedimentos con bandas de grano fino	Más de 15 - - -	SM ML, MH CL, CL-ML CL, CH, ML, SM

Figura 5-19: Clasificación de suelos según susceptibilidad a las heladas. FAA, 2016.

En cuanto al agua libre para formación de lentes de hielo, como regla general, si la saturación del suelo es igual o mayor al 70%, entonces es probable que ocurra congelamiento, lo que puede afectar a suelos susceptibles.

Para suelos del tipo FG-3 y FG-4 es necesario comparar el espesor requerido para el soporte estructural y la profundidad de penetración de las heladas. En caso de existir una diferencia entre ambos valores, entonces se debe remover el material original y rellenar con uno no susceptible a las heladas.

Una opción para suelos tipo FG-1, FG-2 y FG-3 es el método de resistencia reducida de la subrasante, que busca proporcionar al pavimento una capacidad de carga adecuada para resistir el periodo de descongelamiento de heladas, sin considerar el efecto del congelamiento en sí. Este método consiste en determinar los espesores del pavimento usando FAARFIELD, pero ingresando el menor valor de CBR entre los indicados en la Tabla 5-5 y los obtenidos mediante estudios geotécnicos.

Tabla 5-5: Clasificación de reducción de resistencia de Subrasante

Frost Group	CBR Pavimento flexible
FG-1	9
FG-2	7
FG-3	4
FG-4	No aplica

En el diseño presentado anteriormente se utilizó un CBR igual a 4, que corresponde al mínimo valor aceptado por la FAA, constituyendo así un diseño conservador que ya incluye el efecto de penetración de heladas.

Cabe destacar que los aeródromos en los cuales se enfoca este trabajo han estado operando varios años, vale decir, han experimentado unos cuantos ciclos de deshielo sin mostrar fallas a causa de la penetración de heladas. Dicho esto, se puede inferir que este aspecto fue considerado en el diseño estructural de una forma adecuada, por lo que no sería necesario intervenir.

5.3.1 Profundidad de penetración de las heladas

De acuerdo con el Manual de Carreteras, la profundidad de penetración de las heladas z se puede determinar utilizando la siguiente expresión:

$$z = 4.8 \sqrt{I_c} \quad [cm] \quad (15)$$

Donde I_c corresponde al índice de congelamiento y recoge el efecto climático del lugar, tomando en cuenta la magnitud y la duración de las temperaturas bajo 0°C. En un gráfico de Temperatura diaria acumulada vs Tiempo, este índice se calcula como la diferencia entre el punto más alto y el más bajo de la curva, tal como se muestra en la figura.

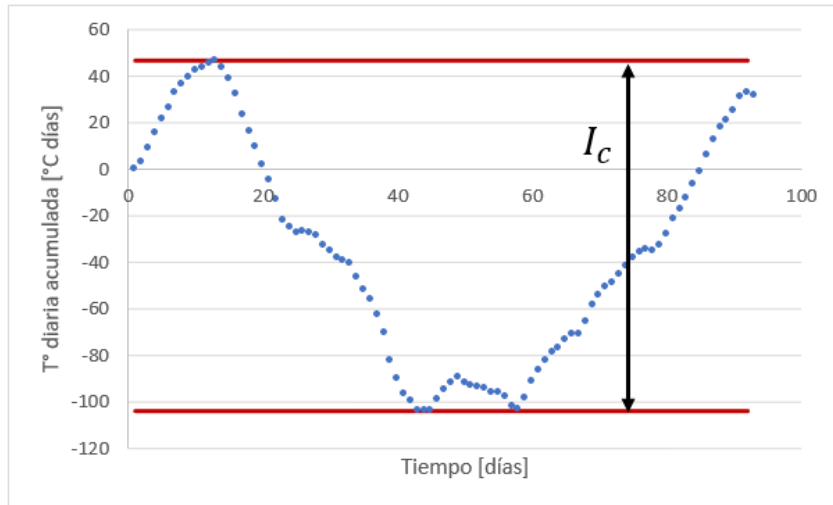


Figura 5-20: Índice de congelamiento para la ciudad de Balmaceda.

En la Región de Aysén las localidades cercanas a la cordillera presentan temperaturas más frías que las localidades cercanas al sector de archipiélagos, por lo que poseen mayor riesgo a la penetración de las heladas. Considerando esto, se calculó I_c con datos meteorológicos de Balmaceda y Coyhaique, obteniendo:

	z promedio [cm]
Balmaceda	56.9
Coyhaique	58.0

Se desprende que una protección de 60 cm es suficiente para evitar que la subrasante sea afectada por penetración de heladas. De acuerdo con el Manual, dicha protección consiste en extraer el material identificado como susceptible en función de esta profundidad y rellenar con material de terraplén que cumpla la condición de no ser heladizo (MC Vol 5, 2020).

La obtención de profundidad de penetración z debe ser realizada para cada zona, ya que las condiciones climáticas pueden fluctuar bastante dentro de una misma región.

Finalmente, dentro del contexto de rehabilitación a través del reciclado del pavimento existente, la protección propuesta por el Manual de Carreteras no es aplicable pues requiere modificar el suelo original mediante reemplazo de material. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno fue considerado a través del método propuesto por la FAA.

5.4 Diseño de pavimentos usando el método CBR

En la circular AC 150/5320-6D, publicada en el año 1995, la FAA estableció un método de diseño para los pavimentos en que operan aeronaves livianas, las que se definen como aquellas de pesos brutos menores a 30000 lb (13600 kg aproximadamente). Si bien este trabajo se enfoca únicamente en el diseño de pavimentos flexibles, este método también se puede aplicar al diseño de pavimentos rígidos.

La principal limitación del método CBR es que no permite diseñar un pavimento para una flota de aviones, sino que debe establecerse un avión de diseño que tendrá un peso específico. Además, tampoco considera la utilización de materiales granulares estabilizados como las BSM. Dadas estas limitaciones y considerando que el único método de diseño vigente es el presentado en la circular AC 150/5320-6F, la aplicación que se presenta a continuación tiene como objetivo sólo la comparación de los resultados obtenidos a través de ambos procedimientos.

Para utilizar este método de diseño es necesario contar con un valor de CBR de la subrasante, uno de la subbase y el peso bruto de la aeronave de diseño.

El espesor mínimo que plantea la FAA para la capa de rodadura asfáltica es de 50 mm, sin embargo, este valor obedece a razones constructivas más que estructurales, ya que espesores menores pueden ser difíciles de colocar y compactar sobre bases granulares. Espesores menores son permitidos siempre que se logre alcanzar un asentamiento y compactación adecuados.

Cuando se quiera utilizar un tratamiento superficial bituminoso en lugar de una capa asfáltica, la capacidad estructural del pavimento estará determinada por la base, subbase y subrasante. En estos casos es necesario aumentar el espesor de la base para compensar la ausencia de capa asfáltica, a una razón de 1.2-1.6 in (30-40 mm) de base por cada 1 in de capa asfáltica arrojada por el diseño.

En la Figura 5-21 se presenta la cartilla de diseño y, como se puede apreciar con la línea segmentada, este método consiste en ingresar al gráfico con el valor de CBR de la subrasante en el eje superior de abscisas y proyectar una línea vertical hasta encontrar la curva que represente el peso bruto de la aeronave de diseño. Luego, se debe proyectar una línea horizontal hasta la intersección con la recta de operaciones anuales y, desde este punto proyectar verticalmente una línea hasta el eje de abscisas inferior, que indica el espesor total requerido. Luego, se repite el procedimiento a partir del valor de CBR de la subbase (si no se conoce puede asumirse un valor de 20) para obtener el espesor de pavimento que debe estar sobre esta capa (base + mezcla asfáltica). Para conocer el espesor de la subbase basta con calcular la diferencia entre los espesores obtenidos en cada procedimiento.

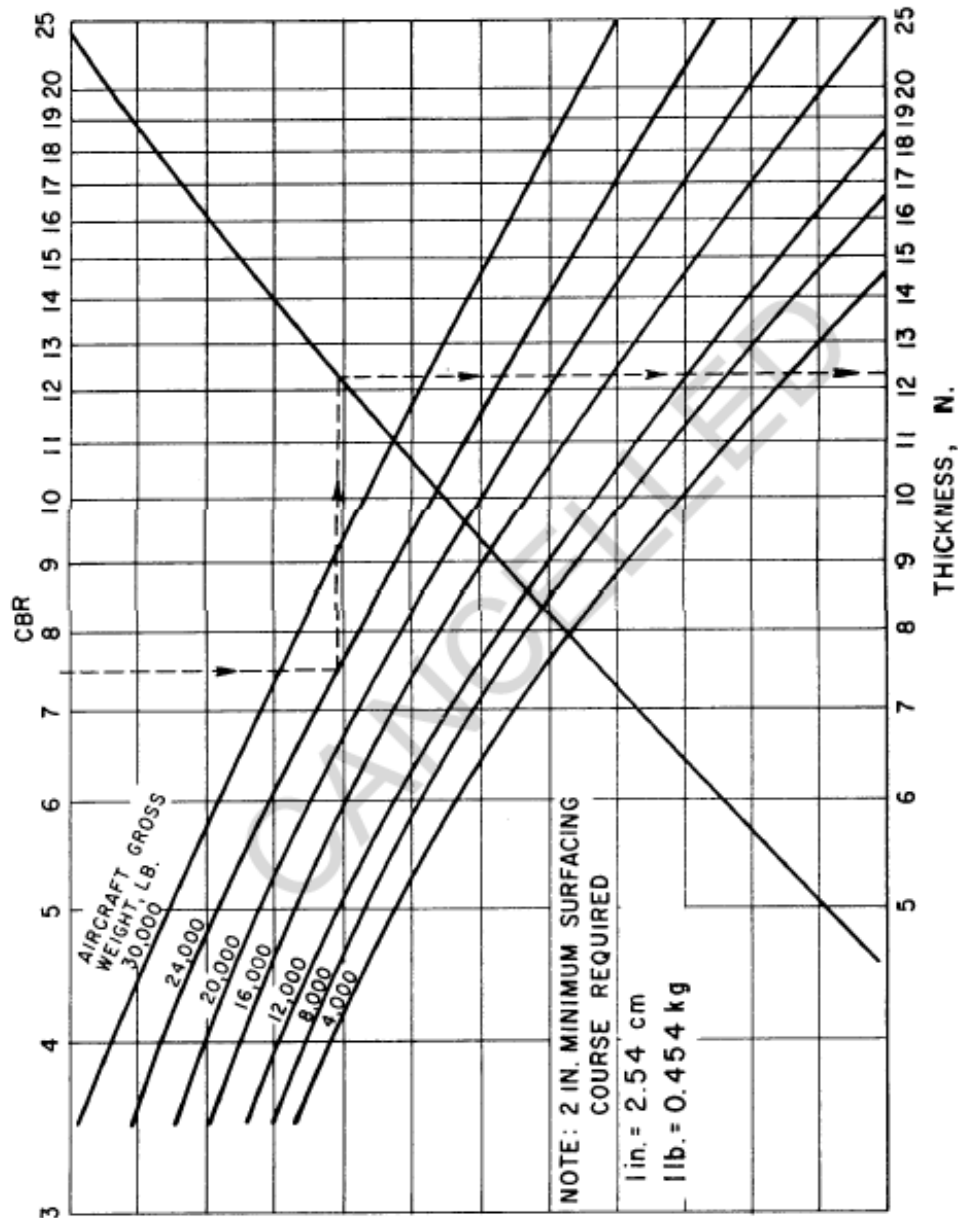


Figura 5-21: Curvas de diseño de pavimentos flexibles para aeronaves livianas. FAA, 1955

5.4.1 Aplicación del método

A continuación, se presenta una comparación de diseño a través de los métodos recién expuestos. Se considera que la carga de diseño corresponde a la aeronave modelo DHC-6-300 cuyo máximo peso al despegue es de 5680 kg. También se considera que la subrasante tiene un CBR igual a 4.

Usando la cartilla de diseño de la Figura 5-21 se obtiene que para un CBR-4 el espesor requerido de pavimento es de 14.1 in (360 mm). Luego, siguiendo la línea de CBR-20 hasta la curva

correspondiente a 5,680 kg, se observa que estas no se intersectan, por lo que se fija el espesor mínimo de 5 in (127 mm). Cabe mencionar que el espesor mínimo para la capa de mezcla asfáltica es de 50 mm, en caso de utilizarse.

Una opción de diseño sería 50 mm de capa asfáltica, 80 mm de base y 230 mm de subbase. Ahora bien, en este trabajo se intenta llegar a un diseño de pavimento compuesto por un tratamiento superficial, una base estabilizada y una subbase, por lo que es necesario aumentar el espesor de la base tal que se compense la ausencia de la capa superficial asfáltica. Dado que la base estabilizada posee una resistencia significativamente mayor a la de una base sin estabilizar, de acuerdo con el método CBR, se debe utilizar una razón de 1.2 para convertir el espesor de capa asfáltica en espesor de base, teniendo:

$$50 \text{ mm}_{\text{capa asfáltica}} * 1.2 \rightarrow 60 \text{ mm}_{\text{base granular}}$$

Sumando dicho espesor al ya obtenido se llega a un diseño final que consiste en un tratamiento superficial bituminoso, 140 mm de base estabilizada y 230 mm de subbase.

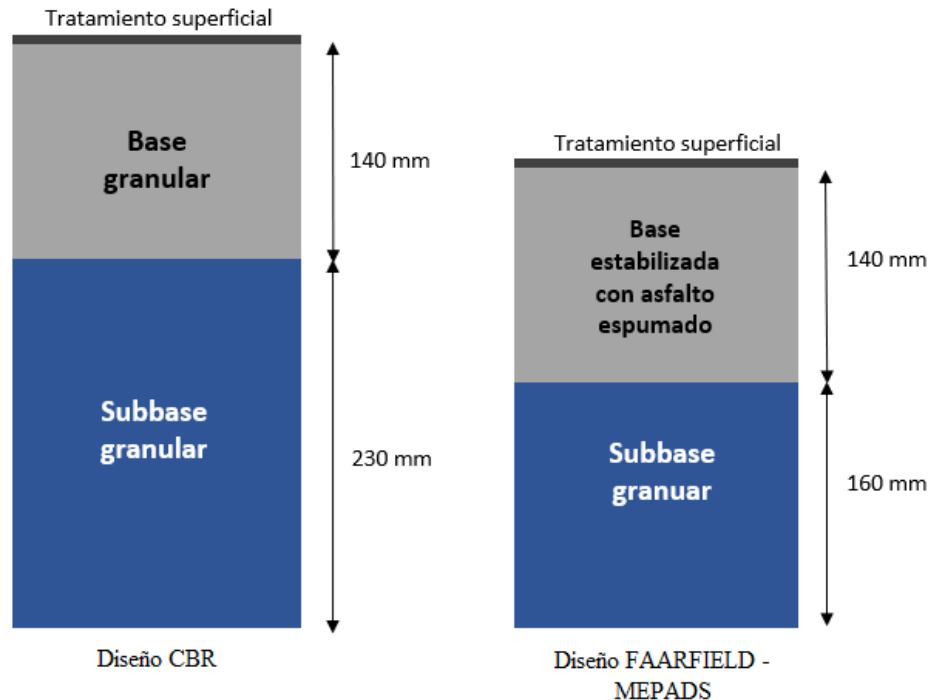


Figura 5-22: Comparación de espesores obtenidos a través del método CBR y método empírico mecanicista

Se puede ver claramente que, al considerar una base estabilizada en el diseño, el espesor total requerido disminuye cerca de un 20% para un mismo valor de CBR. Además, cabe destacar que el diseño FAARFIELD-MEPADS considera el paso de un avión de emergencia C-130, cuyo peso es de 40000 kg aproximadamente, y si éste se hubiese considerado en el diseño CBR, el espesor requerido habría sido aún mayor.

6 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Este trabajo está enfocado en pequeños aeródromos sometidos a bajas solicitaciones (cargas menores a 6000 kg), los cuales además están sujetos a escasas operaciones anuales. En el capítulo anterior se abordó el diseño estructural de un pavimento para resistir las solicitaciones mencionadas, junto con las heladas estacionales propias de la región en estudio, y se pudo comprobar que un pavimento compuesto por una subbase granular junto a una base estabilizada con asfalto espumado, presenta la resistencia adecuada para un periodo de diseño de 20 años.

Dado que la base estabilizada le da la resistencia requerida al pavimento y, considerando los altísimos costos que conllevaría el uso de una carpeta asfáltica sobre ella, no se justifica su aplicación como capa de rodadura. No obstante, sí es necesario proveer una capa de rodadura que entregue buenos parámetros funcionales para el desplazamiento de aeronaves, además de protección a las capas granulares contra agentes climáticos como la infiltración de aguas pluviales que podrían afectar la estabilidad del pavimento (Morante, 2019). Lo anterior puede cumplirse a través de la aplicación de un tratamiento superficial.

Un tratamiento superficial corresponde a una superficie asfáltica que cumple objetivos de mejoramiento de características funcionales, protección en caminos estabilizados, y de conservación en el caso de pavimentos asfálticos. Se caracterizan por ser económicas y duraderas para caminos de bajo tránsito, entregando una superficie estable resistente al desgaste, deslizamiento e infiltración de agua.

Es importante destacar que los tratamientos superficiales no poseen capacidad estructural, sino que están enfocados en la funcionalidad del pavimento, y que su espesor, así como el contenido de bitumen, se consideran despreciables en términos de evaluación estructural. Su composición varía desde una delgada capa de ligante o emulsión asfáltica, hasta múltiples aplicaciones alternadas de ligante asfáltico seguido de una cobertura de agregado pétreo.

La elección del tratamiento superficial más adecuado para utilizar sobre un pavimento dependerá de la capa sobre la cual será aplicado y de las condiciones externas que se buscan atender. En el caso particular de los aeródromos tratados en esta guía, las características que debe cumplir el tratamiento superficial son:

- Que sea aplicable sobre una base granular
- Que provea impermeabilización a la base estabilizada con asfalto espumado
- Que mejore la resistencia al deslizamiento
- Que proteja la integridad estructural del pavimento

6.1 Tipos de tratamientos superficiales y selección de capa de rodadura

Por un lado, se tienen los riegos asfálticos, los cuales no poseen áridos en su composición, y se indican en la siguiente tabla:

Tabla 6-1: Características de riegos asfálticos.

Tipo	Composición	Capa de aplicación	Función
Imprimación	Emulsión asfáltica de quiebre lento.	Base granular	Impermeabilizar la base, evitar capilaridad, unir partículas sueltas y proveer adhesión entre la base y la capa superior.
Riego de Liga	Emulsión asfáltica de quiebre lento.	Capa asfáltica	Proveer adhesión entre la superficie pavimentada existente y la capa asfáltica que la cubrirá.
Riego neblina (Fog seal)	Emulsión asfáltica de quiebre lento.	Capa asfáltica o tratamiento superficial	Sellar fisuras superficiales en pavimento envejecido o mejorar retención de áridos en pavimentos recién construidos.

Se observa que estos tratamientos no cumplen algunas de las características cruciales que se buscan, por ejemplo, aumentar la resistencia al deslizamiento. De hecho, al no poseer áridos, estos riegos asfálticos pueden disminuir la fricción del pavimento considerablemente, por lo que están pensados para aplicarse debajo de la capa de rodadura o para sellar pequeñas fisuras de un pavimento existente, mas no para ser aplicados como una capa de rodadura por sí solos.

Si bien no se recomienda que sean usados como capa de rodadura, sí es beneficioso aplicarlo sobre la base estabilizada con asfalto espumado y debajo del tratamiento superficial a utilizar.

Por otro lado, se tienen los tratamientos superficiales que sí utilizan áridos de distintas graduaciones:

Tabla 6-2: Características de tratamientos superficiales bituminosos.

Tipo	Composición	Capa de aplicación	Función
Sellos bituminosos	Emulsión asfáltica de quiebre rápido, recubierto por áridos.	Capa asfáltica	Detener envejecimiento, mejorar resistencia al deslizamiento del pavimento.
Lechada asfáltica (Slurry seal)	Mezcla de árido fino bien graduado, emulsión de quiebre lento, filler y agua.	Capa asfáltica o base estabilizada	Impermeabilizar la superficie, conservar capas estructurales, mejorar la resistencia al deslizamiento y sellar grietas superficiales.

Microaglomerado en frío	Mezcla de árido chancado bien graduado, emulsión modificada de quiebre lento, filler y agua.	Capa asfáltica	Impermeabilizar y rejuvenecer pavimentos, mejorar resistencia al deslizamiento y proveer resistencia al daño por temperaturas extremas y gradientes térmicos.
Tratamientos superficiales	Una o más aplicaciones de emulsión asfáltica recubierta por áridos.	Base granular	Impermeabilizar la superficie y proveer una capa de rodadura antideslizante y resistente a la acción del tránsito.
Cape seal	Una capa de tratamiento superficial simple, seguida por una capa de lechada asfáltica.	Base granular	Impermeabilizar superficie, proveer una capa de rodadura con alta durabilidad, resistencia a la acción del tránsito y resistencia al deslizamiento.

Al observar las capas sobre la que pueden ser aplicados, junto con sus principales funciones, se infiere que las opciones más adecuadas son la aplicación de un slurry seal o de un tratamiento superficial múltiple (doble o triple).

El slurry seal está compuesto por sólo una capa de mezcla de emulsión, agregado y filler, a diferencia de un tratamiento superficial múltiple. Si bien esta condición puede traer ventajas como la disminución del costo y la rapidez de aplicación, también se presentarán algunas desventajas con respecto a un tratamiento superficial múltiple como, por ejemplo:

- Tendrá menor capacidad de carga pues la capa de rodadura es más delgada, siendo más propensa al daño y, por ende, menos resistente al tráfico del aeródromo.
- En condiciones de heladas estacionales, en especial, frente a ciclos de congelamiento – descongelamiento, será más susceptible al agrietamiento y factura.
- Presentará menor adherencia a la BSM que un tratamiento superficial, lo que conlleva una menor resistencia al desgaste y durabilidad.

Considerando esto, es válido plantear que un tratamiento superficial múltiple es el más adecuado para ser aplicado como capa de rodadura. Independientemente de si la estructura es doble o triple, estos tratamientos proporcionan una capa más robusta, con mayor resistencia a la carga de las aeronaves, mayor resistencia a las condiciones climáticas de la región, mejor textura superficial debido al perfilado constante durante la construcción, y mayor durabilidad. Todo esto se traduce en una mayor vida útil y, por lo tanto, un costo menor de mantenimiento con respecto a las otras opciones.

6.2 Casos de éxito de tratamiento superficial múltiple

6.2.1 Ruta 5 Norte, Chañaral - TSD

En el año 2004, el Ministerio de Obras Públicas finalizó la reposición de un tramo de la Ruta 5 Norte utilizando un tratamiento superficial doble. Originalmente, el tramo estaba compuesto por un pavimento flexible en un estado de deterioro avanzado, que se evidenciaba a través de agrietamientos longitudinales y transversales en la carpeta asfáltica, desprendimiento de material granular proveniente de la capa inferior, ahuellamiento y baches (Queirolo, 2009).

La Dirección de vialidad optó por rehabilitar un tramo de 3.5 km, colocando una base granular estabilizada de 180 mm de espesor sobre el pavimento existente, para luego aplicar un tratamiento superficial doble con emulsión elastomérica de 25 mm de espesor. El mismo tramo fue evaluado cuatro años después, en el año 2008, a través de la obtención de deflexiones máximas, número estructural del pavimento, índice IRI e índice de serviciabilidad.

Al comparar los resultados antes y después de la rehabilitación, se observó que:

- Las deflexiones máximas eran pequeñas, sin cambios destacables a causa de la rehabilitación, y similares a lo largo del tramo.
- El número estructural era levemente mayor después de la rehabilitación, con variaciones en el tramo asociadas directamente a la variación del tránsito debido a bifurcaciones de la ruta.
- Aun cuando fue en porcentajes moderados, el IRI disminuyó después de la rehabilitación, en tanto que el índice de serviciabilidad aumentó.

La evaluación del tramo rehabilitado determinó que la estructura del tratamiento superficial doble se mantuvo en muy buenas condiciones, y que también mejoró el comportamiento funcional del pavimento.

6.2.2 Ruta 5 Norte, Polpaico - TSD

Desde el año 1995, en el sector entre Polpaico y La Trampilla, existe un tramo experimental de 3.5 km construido por la Dirección de Vialidad, con el fin de evaluar y comparar el comportamiento de distintas soluciones de pavimentos. En los primeros 500 metros existe un pavimento flexible cuya capa de rodadura es un tratamiento superficial doble, el cual fue construido con distintos ligantes: usaron una emulsión normal durante 250 m (Tramo A), y una emulsión elastomérica en los otros 250 m (Tramo B).

Luego de un análisis de 12 años, se observó que el IRI aumentó significativamente en el tramo A, pasando de 2.4 m/km a 4.0 m/km en un período de 5 años, disminuyendo su serviciabilidad de manera progresiva. En ese mismo período, el IRI del tramo A aumentó de 2.1 a 2.9 m/km, mientras que su serviciabilidad bajó de manera muy leve, manteniéndose casi constante.

Con respecto a la deflectometría de impacto, se compararon mediciones obtenidas a los 4 años de servicio y a los 12 años (75% de MEE de diseño registrados), y se observó que el tramo A presentaba mejores características estructurales en ambas evaluaciones.

De acuerdo con estos antecedentes, se desprende que el tratamiento superficial con emulsión normal se comportó mejor que el tramo con emulsión elastomérica (Queirolo, 2009).

6.2.3 *Aeródromo de Huancabamba - TST*

En el norte de Perú, en la Región de Piura, se ubica el aeródromo de Huancabamba, construido en el año 1934. Su pista de aterrizaje era de 1100 m y el pavimento consistía en una base granular de 20 cm de espesor y un tratamiento superficial doble como capa de rodado, por lo que solo estaba autorizado a recibir aeronaves cuyo peso bruto no superara los 5600 kg.

Luego de una inspección que evidenció el mal estado del aeródromo y, posteriormente, un proyecto de inversión pública, en el año 2017 se ejecutaron las obras de rehabilitación y mejoramiento, que buscaban, dentro de otras cosas, obtener una pista de aterrizaje capaz de soportar aeronaves de peso bruto hasta 13000 kg. Esta vez, el pavimento debía estar conformado por una subbase de 25 cm, una base de 15 cm y un tratamiento superficial triple. Cabe mencionar que los espesores del pavimento fueron obtenidos mediante el método de diseño FAARFIELD y que el proceso constructivo fue controlado rigurosamente.

Este proyecto arrojó que el tratamiento superficial triple brindó una capa de rodadura estable, antideslizante, y con un índice de rugosidad menor a 2.5 m/km. Además, se consideró efectivo para proteger las capas granulares del pavimento, lo que permite que la pista de aterrizaje resista la carga objetivo de 13000 kg.

6.3 Comentarios

Con base en el análisis de las características de los distintos tratamientos superficiales, junto con sus ventajas relativas al momento de cubrir las necesidades planteadas al inicio del capítulo, se establece que un tratamiento superficial múltiple es adecuado para ser utilizado como capa de rodadura de un aeródromo.

Además, como se pudo encontrar en la literatura, esta solución ya ha sido implementada en caminos y aeródromos, resultando exitosa tanto para TSD como TST. Sin embargo, es relevante mencionar que dichas experiencias no contaban con las condiciones climáticas que se encuentran en la región de Aysén, sino que fueron proyectos en zonas de climas desértico (Chañaral), mediterráneo (Polpaico) y templado (Huancabamba).

El tratamiento superficial triple, al tener una capa adicional, será capaz de distribuir de mejor manera los esfuerzos producto de los ciclos de congelamiento y descongelamiento, además de crear una barrera más robusta que proteja al pavimento de la infiltración de agua en la capa BSM. Esto se traduce en una mayor durabilidad y vida útil.

Finalmente, se propone que, en aeródromos ubicados en zonas de mayor oscilación térmica y con mayor presencia de ciclos de congelamiento, tales como Chile Chico, Teniente Vidal, etc., es coloque un tratamiento superficial triple. Para los aeródromos ubicados en zonas más templadas, por ejemplo, el aeródromo Melinka, se propone usar un tratamiento superficial doble.

7 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas para la construcción in situ de una base estabilizada para un aeródromo a través del uso de la técnica de reciclado con asfalto espumado.

7.1 Materiales

7.1.1 *Material granular*

Corresponde al conjunto de partículas que se producen por la pulverización del pavimento a través de la máquina recicladora, y está compuesto por RAP, base granular y subbase, dependiendo de la profundidad del reciclado. Un resultado satisfactorio de la estabilización con asfalto espumado dependerá, en parte, de que el material granular utilizado esté dentro de ciertos límites de tolerancia.

En cuanto a la granulometría, se deberá procurar que el porcentaje de finos sea mayor a un 5%, lo que permitirá asegurar una dispersión adecuada del asfalto espumado, además de una banda granulométrica continua en el agregado de tamaño menor a 2 mm, para reducir el contenido de vacíos dentro de la mezcla.

El agregado deberá ajustarse a la siguiente banda:

Tabla 7-1: Graduación requerida.

Tamiz mm	% que pasa Mín.	% que pasa Máx.
50.0	100	100
37.5	87	100
28.0	76	100
20.0	65	100
14.0	55	100
10.0	47	89
7.1	40	78
5.0	34	68
2.0	22	48
1.0	15	37
0.600	11	30
0.425	9	26
0.300	7	22
0.150	5	17
0.075	5	14

Otra característica a controlar es el índice de plasticidad, el cual no puede ser mayor a 10 (ASTM D 4318). Además, el agregado a utilizar no debe tener material vegetal o de otro tipo que impida la buena adherencia con el asfalto espumado.

Si es que el material granular a reciclar no cumpliera con alguna de estas características, deberá incorporarse una cantidad de agregado virgen tal que permita cumplir los límites mencionados.

7.1.2 Bitumen

Un factor importante en el reciclado con asfalto espumado es que el bitumen sea capaz de generar una espuma de buena calidad, esto es, con una razón de expansión y vida media lo más altas posible. La razón de expansión corresponde a la razón entre el volumen máximo de espuma relativo al volumen original del bitumen; mientras que la vida media se calcula como el tiempo que tarda la espuma en colapsar hasta la mitad de su volumen máximo.

Se recomienda que la espuma tenga las siguientes características:

- Razón de expansión: 10 veces
- Vida media: 8 segundos

La razón de expansión y vida media deben medirse en el laboratorio para distintos contenidos de agua y a distintas temperaturas (al menos 3 valores entre 150°C-190°C). De esta forma es posible conocer el contenido de agua y la temperatura del bitumen que producen las mejores características de espuma.

Además, se recomienda usar un asfalto del tipo CA-14 para esta técnica. En ningún caso podrán utilizarse asfaltos modificados, ya que pueden causar obstrucción en las líneas de conducción y boquilla de la máquina de espumado, dificultando la creación de una espuma constante que permita una adecuada dispersión del bitumen dentro de la mezcla.

7.1.3 Agregado mineral o Filler activo

La adición de filler activo se debe realizar en todos los casos pues ayuda a mejorar la dispersión del bitumen en la mezcla, mejorar su adhesión al agregado, asegurar una resistencia inicial adecuada y reducir la susceptibilidad a la humedad del material estabilizado.

Se recomienda usar un contenido de agregado mineral igual a 1%. Además, la relación entre el asfalto y filler añadidos, siempre debe ser mayor a 1.

El filler activo a utilizar debe cumplir con los requisitos de ASTM D 242, y el contratista deberá especificar claramente el tipo de filler, dosificación y método de aplicación in-situ.

Para evitar que las partículas finas se adhieran entre sí producto de la hidratación del agregado mineral, se recomienda reducir al mínimo el tiempo transcurrido entre la mezcla del filler con el material y la aplicación del asfalto espumado.

7.1.4 Agua

El agua adicionada, debe estar limpia y libre de sustancias que puedan dañar el producto final (ácido, alcalino, sales, azúcares u otra sustancia orgánica o química), según ASTM D 516.

7.2 Equipos

7.2.1 Recicladora

El proceso de reciclado en frío y en el sitio, deberá ser ejecutado con una máquina recicladora fabricada específicamente para recuperar materiales de un pavimento asfáltico y mezclarlo con agua, asfalto y cualquier material pre-posicionado sobre la superficie existente (en las proporciones dadas por la Mezcla de Diseño); todo en una operación continua y de una sola pasada.

El proceso puede ser realizado por recicladoras de unidad simple o múltiple (ver 3.1.1 y 3.1.2) ya sea montadas sobre neumáticos u orugas, ubicadas en el borde del área de reciclado.

La recicladora debe ser capaz de reciclar en el sitio la profundidad requerida por el Proyecto, y debe contar con un sistema de control que monitoree la profundidad de corte y la inclinación relativa del equipo.

El tambor fresador de la recicladora deberá poseer las herramientas de corte necesarias para la disgregación del material que se está reciclando. Tendrá un ancho de corte de al menos 2 metros y la capacidad de cambiar su velocidad de rotación para pulverizar y mezclar una variedad de espesores y tipos de materiales.

El equipo deberá contar con dos barras de inyección de fluidos independientes, uno para el asfalto y otro para el agua, cuyo paso debe estar regulado y graduado de manera exacta a través de un microprocesador, el cual también permitirá controlar la velocidad de avance de la máquina y la profundidad del reciclado, de modo de asegurar una mezcla homogénea acorde a los requerimientos del Proyecto. Adicionalmente, deberá contar con una pantalla que informe los parámetros del reciclaje en tiempo real, para su constante monitoreo.

La máquina recicladora se conectará a un camión cisterna de betún y éste, a su vez, se conecta a un camión de suministro de agua. Delante de ellos debe espolvorearse el cemento (u otro filler activo) a través de un camión esparcidor o de algún sistema semi mecanizado que permita una distribución uniforme del filler sobre el pavimento.

El sistema de salida del material reciclado debe disminuir la segregación de las partículas, posicionándolo continuamente como una nueva capa detrás de la excavación creada por la recicladora.

El contratista deberá proporcionar, para la validación del Inspector Fiscal, los detalles técnicos del equipo que se usará en el reciclado, al menos dos semanas antes del comienzo del trabajo. Para equipos de antigüedad superior a 10 años, se deberá adjuntar la certificación del fabricante del equipo que acredite su capacidad operacional para cumplir con su propósito, con una vigencia no superior a tres meses, contados desde el inicio de las obras.

7.2.1.1 Recicladora de unidad simple

Máquinas equipadas para fresar, mezclar, estabilizar y depositar el material reciclado en su posición final, mediante una sola unidad. El tambor fresador está incorporado dentro de una cámara mezcladora cerrada.

7.2.1.2 Recicladora de unidad múltiple

El proceso de fresado e incorporación del ligante ocurre en unidades distintas, pudiendo tener hasta 3 unidades dispuestas una tras otra en forma de tren, permitiendo realizar el procedimiento de forma adecuada y continua.

7.2.2 Equipos de compactación y perfilado

Los equipos de compactación utilizados normalmente son rodillos lisos vibratorios de uno o dos tambores (tándem) y rodillos neumáticos pesados. También es aceptado el uso del rodillo tipo “pata de cabra” para la compactación primaria (véase 6.5.1). La masa estática de los rodillos será determinada según el espesor de la capa reciclada, y la amplitud y frecuencia del rodillo vibratorio deberá ser variable.

Para la nivelación y perfilado se requiere de, al menos, una motoniveladora, idealmente con estación total robótica.

Todos los equipos deben estar en perfectas condiciones mecánicas, en especial en lo que se refiera a la suavidad de los arranques, paradas e inversiones de marcha. La cantidad de equipo que deberá disponer el Contratista se ajustará a los requerimientos de la Obra.

7.2.3 Camiones cisterna

Los camiones deben transportar y contener los volúmenes de agua y bitumen, por separado. Estos deben dimensionarse de acuerdo al alcance del trabajo y la geometría del pavimento.

Los camiones utilizados para el transporte de bitumen deben tener la capacidad de mantener una temperatura constante alrededor de 160°C.

Los camiones deberán ir acoplados delante de la recicladora, primero el camión (o sistema mecanizado) esparcidor de filler activo, luego el camión con agua y luego el que contiene el asfalto. Los camiones distribuidores de agua y asfalto van conectados a la recicladora por medio de tuberías flexibles, las que deben funcionar bajo succión y, por lo tanto, deben ser capaces de resistir la presión negativa.

Adicionalmente, para promover el flujo de succión sin restricciones en la bomba de la recicladora, el diámetro interno de la tubería de alimentación no debe ser inferior a 75 mm.

7.3 Diseño de mezcla

El procedimiento para determinar la Mezcla de Diseño del material reciclado y estabilizado asfalto espumado debe ser propuesto por el Contratista, realizado a su costo, por un laboratorio que disponga del personal calificado, infraestructura y equipos que permitan simular en el laboratorio el proceso en terreno.

El Contratista primero deberá realizar a su costo, una inspección de la superficie a través de ensayos no destructivos como el Deflectómetro de Impacto (FWD) (ASTM D 4694) o el Georadar (ASTM D 6432), comprobando los espesores y cambios de materialidad de las capas, contrastándola con los datos referenciales y secciones homogéneas provistas por el Proyecto. En caso de existir diferencias en los resultados, el Contratista podrá proponer correcciones a las secciones homogéneas, las que deberán ser entregadas al I.F. para su visto bueno y posterior incorporación en el proceso de diseño de mezcla.

Para definir el diseño de mezcla, se tomarán muestras del material a reciclar, en el espesor provisto de cada tramo homogéneo. Las muestras de material se tomarán mediante una fresadora que produzca un fresado semejante al de la máquina que se vaya a emplear en la ejecución del reciclaje, o mediante la excavación de al menos una calicata si así lo permite el I.F.

La banda granulométrica obtenida debe compararse con la presentada en la Tabla 1, superponiendo ambas bandas en un mismo gráfico. Si la banda del material no cumple con la recomendada, el Contratista deberá importar material de recebo, el cual corresponderá a arenas rodadas, gravas o gravillas chancadas provenientes de empréstitos autorizados por el inspector fiscal del proyecto, y deberá cumplir con lo siguiente:

Tabla 7-2: Requerimientos para áridos de recebo.

Ensayo	Norma	Requerimiento
CBR	ASTM D 1883	60% mín
Partículas lajeadas	ASTM D 4791	15% máx
Partículas chancadas	ASTM D 4791	50% mín
Desgaste de los Ángeles	ASTM C 131	30% máx
Equivalente de arena	ASTM D 2419	50% mín
Índice Plástico	ASTM D 4318	NP

7.3.1 Caracterización de la espuma

Las propiedades de la espuma dependen del contenido de agua añadido y de la temperatura del bitumen. Para encontrar las propiedades más favorables deberán producirse espumas con distintos contenidos de agua y a distintas temperaturas durante el diseño de mezcla.

Para una misma temperatura (dentro del rango 150°C – 180°C) deberá formarse asfalto espumado para, al menos, tres contenidos distintos de agua, midiendo la razón de expansión y vida media cada vez. El procedimiento se debe repetir para tres o más temperaturas distintas.

Dentro de las espumas que cumplan con los requerimientos mínimos (Ver 2.2) se elegirá la combinación % agua – T °C que maximice las características de la espuma, dándole una leve prioridad a la vida media por sobre la razón de expansión.

A partir de la combinación de contenido de agua y temperatura seleccionada, deberán fabricarse 6 probetas Marshall, las que se ensayarán a tracción indirecta (ITS): tres en condición seca y tres en condición saturada (Anexo A). El Contratista debe presentar un valor de resistencia a la tracción retenida (TSR) asociado al contenido de asfalto trabajado.

El procedimiento debe realizarse para, al menos, cuatro contenidos distintos de asfalto. El contenido de asfalto óptimo será aquel con el cual se obtenga el máximo valor de ITS saturado, y además debe cumplir con lo requerido en la siguiente tabla:

Ensayo	Norma	Requerimiento
ITS seco, kPa	AASHTO T 283	200 mín
ITS saturado, kPa	AASHTO T 283	100 mín
TSR, %	AASHTO T 283	75 mín

El Contratista deberá presentar el informe con la Mezcla de Diseño de cada sección homogénea para su aprobación al Laboratorio de la Dirección Nacional de Aeropuertos, con copia a la Inspección Fiscal. En caso de ser rechazado, este proceso se repetirá hasta obtener la aprobación final del IF.

La aprobación del diseño de mezcla por parte del IF, no exime al Constructor de su plena responsabilidad de alcanzar la calidad exigida en terreno.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la revisión de literatura, el reciclado de pavimentos in situ utilizando asfalto espumado es una técnica ampliamente estudiada que se ha aplicado con éxito en caminos hace más de 20 años. Sin embargo, esta vasta experiencia no se ha llevado a los pavimentos aeroportuarios, los cuales presentan las mismas necesidades de conservación y mejoramiento que los caminos.

Principalmente, los pavimentos de aeródromos deben contar con una estructura capaz de soportar las cargas provocadas por el despegue de las aeronaves permitidas en el mismo, y con una capa de rodadura que provea una resistencia al deslizamiento adecuada. En el caso específico de los aeródromos de la región de Aysén, estos pavimentos además están expuestos a mucha lluvia y bajas temperaturas, conllevando ciclos de congelamiento y descongelamiento, por lo tanto, el diseño del pavimento debe evitar la infiltración de agua en capas inferiores y considerar las tensiones provocadas por el congelamiento.

Las condiciones climáticas de la región, sumadas a la baja frecuencia de mantenimiento de los aeródromos, han provocado que muchas pistas presenten daños severos en su capa de rodadura, como desprendimiento de áridos, pérdida de resistencia al deslizamiento y presencia de grietas, disminuyendo significativamente su serviciabilidad. No obstante, estos daños son superficiales y la estructura del pavimento, así como los materiales que lo componen, se encuentran en buen estado. Es en estos casos en los que se planteó que una muy buena opción de rehabilitación era el reciclado con asfalto espumado.

Para facilitar su implementación en un futuro, se desarrolló una guía que explica los pasos a seguir en cada etapa: estudios necesarios para identificar el estado actual del pavimento y la factibilidad de usar el material existente en una BSM, metodología a seguir para un correcto diseño de espuma y mezcla BSM, metodología de diseño estructural mediante el método de la FAA y verificación a través del software MEPADS, y recomendación de tratamiento superficial a utilizar como capa de rodadura.

En cuanto al diseño estructural, se consideró una proyección del tránsito registrado para una vida útil de 20 años, una flota regular de aviones cuyo peso ronda los 6,000 kg y el paso ocasional de un avión de emergencia de 42,200 kg, una base granular de módulo resiliente 1,100 MPa, y una subrasante con CBR 4%. A través del software FAARFIELD, se obtuvo que el factor de daño acumulado (CDF) llegaba al 100% para un pavimento con los siguientes espesores: Base granular de 14 cm y subbase de 12.5 cm. Dado que este software no permite incorporar las características viscoelásticas que adquiere una base al mezclarse con asfalto espumado, la estructura diseñada se verificó en MEPADS, utilizando la ecuación de fatiga del asfalto espumado. De aquí se obtuvo que un pavimento compuesto por una BSM de 14 cm y una subbase de 15 cm, es capaz de soportar el paso del avión de emergencia más de 147 veces y el paso de aeronaves registradas como flota, más de 6,500 veces, pudiendo concluir que el

pavimento compuesto por una base estabilizada con asfalto espumado cumple con lo requerido por la FAA.

La recomendación para la capa de rodadura es utilizar un tratamiento superficial triple, en caso de presencia de ciclos de congelamiento – descongelamiento, y un tratamiento superficial doble cuando no existan estos ciclos. Este tipo de tratamiento resulta idóneo para las condiciones climáticas de Aysén, y ha mostrado resultados exitosos tanto en Chile, como en el extranjero.

Adicionalmente, algunos cuidados que deben tenerse durante el proceso de construcción son: realizarlo únicamente si la temperatura ambiente es mayor a 10°C, para asegurar que los finos queden cubiertos por asfalto; cuidar minuciosamente la temperatura del asfalto, sin dejar que sobrepase los 180°C, con el fin de evitar un envejecimiento prematuro; y extender el filler activo de manera uniforme y que su contenido nunca sobrepase el 1% para evitar que aumente la rigidez de la BSM de manera excesiva.

El desarrollo de esta guía para aeródromos de bajo tráfico deja en evidencia que, a través de la adaptación de algunos criterios y metodologías, es posible diseñar un pavimento con propiedades estructurales y de serviciabilidad adecuadas para soportar el tránsito proyectado y las condiciones climáticas. Esto se ha validado a través del estado del arte y experiencias previas. Así, este trabajo viene a ofrecer una solución económica, sostenible, eficiente y técnicamente factible para la conservación y extensión de vida útil de pavimentos de aeródromos.

Finalmente, se recomienda monitorear el estado de los pavimentos rehabilitados con esta técnica, con el fin de evaluar su desempeño ante las cargas y su respuesta frente a las condiciones climáticas. Esto permitirá nutrir el estado del arte y llegar a criterios más precisos para su diseño y construcción.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asphalt Academy. (2009). Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. Pretoria, Sudáfrica.

Biblioteca del Congreso Nacional (BCN) (2018). Indicadores Sociodemográficos y Económicos Región de Aysén: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11/indica.htm>

Consejo Políticas de Infraestructura (CPI). (2019). En marcha concesión del aeródromo de Balmaceda. Santiago, Chile.

DGAC. (2005). Léxico: Definiciones y Acrónimos de la DGAC. Santiago, Chile.

DGAC. (2020). Red Aeroportuaria Nacional: <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>

Dirección de aeropuertos (DAP). (2013). Diagnóstico de la Infraestructura de Pequeños Aeródromos Región de Aysén. Chile.

Dirección de aeropuertos (DAP). (2017). Sistema de Gestión de Mantenimiento. Chile.

Federal Aviation Administration (FAA). (2016). AC 150/5320-6F: Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos.

Gobierno Regional de Aysén. (2018). Diagnóstico De Caracterización Socioeconómica De La Región De Aysén. Coyhaique, Chile.

Instituto Chileno de Estudios Municipales. (2017). Índice de Desarrollo Regional IDERE 2017. Santiago, Chile.

Junta Aeronáutica Civil. (2020). Informes del Número de Operaciones Realizadas en los Aeropuertos y Aeródromos de Chile. Santiago, Chile.

Martucci, J. (2018). Reciclado de Pavimentos In Situ Utilizando la Técnica de Asfalto Espumado (Tesis de Maestría). Rosario, Argentina.

Morante H. (2019). Pavimento Flexible con Tratamiento Superficial para Aeródromo de Tráfico Ligero (Tesis de Grado). Piura, Perú.

Paniagua, F., Halles, F., Thenoux, G., González, A. (2013). Evaluación de la rigidez a largo plazo de mezclas estabilizadas con asfalto espumado y cemento. XVII Congreso Latinoamericano del Asfalto, Guatemala.

Queirolo, A. (2009). Seguimiento de un Doble Tratamiento Superficial Para Camino de Alto Tránsito (Tesis de Grado). Santiago, Chile.

SERNATUR. (2014). Plan de Acción Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, Sector Turismo. Chile.

Thenoux, G. y García, G. (1999). Estudio de Técnicas de Reciclado en Frío: Primera Parte. Chile.

Wirtgen GmbH. (2004). Manual de Reciclado en Frío. Windhagen, Alemania.

Wirtgen GmbH. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. Windhagen, Alemania.

Wirtgen GmbH. (2020). Recicladoras en frío y estabilizadoras Serie WR. Alemania.

10 ANEXOS

10.1 Bandas granulométricas según literatura

Tabla 10-1: Granulometrías recomendadas para estabilización con asfalto espumado

Guía TG2, 2020			Manual Wirtgen, 2012			MC Vol 5, 2020			Austroads, 2019		
Tamiz mm	% mín	%máx	Tamiz mm	% mín	%máx	Tamiz mm	% mín	%máx	Tamiz mm	% mín	%máx
50.0	100	100	50.0	100	100	40.0	100	100	37.5	100	100
37.5	87	100	37.5	87	100	25.0	74	98	19.5	80	100
28.0	76	100	26.5	76	100	12.5	49	82	9.5	55	90
20.0	65	100	19.0	65	100	10.0	43	74	4.75	40	70
14.0	55	100	13.2	55	90	5.0	29	54	2.36	30	55
10.0	47	89	9.5	48	80	2.5	20	42	0.425	12	30
7.1	40	78	6.7	41	70	1.25	14	35	0.075	5	20
5.0	34	68	4.75	35	62	0.630	10	28			
2.0	22	48	2.36	25	47	0.315	8	24			
1.0	15	37	1.180	18	36	0.160	7	21			
0.600	11	30	0.600	13	28	0.075	5	18			
0.425	9	26	0.425	11	25						
0.300	7	22	0.300	9	22						
0.150	5	17	0.150	6	17						
0.075	4	14	0.075	4	12						

10.2 Banda granulométrica recomendada

Tabla 10-2: Banda granulometría recomendada para estabilización con AE en la Región de Aysén.

Granulometría recomendada		
Tamiz mm	% mín.	%máx.
50.0	100	100
37.5	87	100
28.0	76	100
20.0	65	100
14.0	55	100
10.0	47	89
7.1	40	78
5.0	34	68
2.0	22	48
1.0	15	37
0.600	11	30
0.425	9	26
0.300	7	22
0.150	5	17
0.075	5	14

10.3 Procedimiento de diseño de mezcla

10.3.1 Muestreo y Preparación

10.3.1.1 Muestreo

A partir de la excavación de calicatas durante la investigación del terreno y su evaluación estructural, se deben extraer muestras de material de cada capa superficial del pavimento. Para cada una de las capas, y de manera separada, se debe recuperar al menos 150 kg de material.

10.3.1.2 Preparación de muestras para el diseño de mezclas

Ensayos estándar de mecánica de suelos

Se debe determinar la granulometría (ASTM D422) y el índice de plasticidad (ASTM D4318) del material recuperado de cada capa en forma individual. A fin de obtener una muestra representativa del material a reciclar, se recomienda mezclar el material muestreado de las diferentes capas de manera proporcional al espesor de cada una de ellas y a la densidad in situ de cada material. Luego de esto, se deben repetir los ensayos de granulometría e índice de plasticidad para la muestra mezclada.

Proporción representativa

Se debe separar el material en cuatro fracciones dependiendo del tamiz por el que pasan o quedan retenidos. A continuación, se indican las porciones recomendadas.

Tabla 10-3: Separación de material por tamiz

Fracción	Mayor a	Menor a
1	19.0 mm	-
2	13.2 mm	19.0 mm
3	4.75 mm	13.2 mm
4	-	4.75 mm

Una vez separado el material, lo siguiente es reconstituir muestras representativas sobre la porción que pasa el tamiz de 19 mm. Se debe sustituir el material de la fracción 1 con el material de la fracción 2. En caso de no existir suficiente material de la fracción 2 para sustituir el retenido por el tamiz de 19 mm, entonces se debe moler ligeramente el material de la fracción 1 para que pase por el tamiz de 19 mm y así aumentar la fracción 2.

Cantidades de muestra

Una guía para las cantidades de material requeridas en los ensayos posteriores se indica en la Tabla 10-4: Cantidades de muestras requeridas por ensayo.

Tabla 10-4: Cantidades de muestras requeridas por ensayo

Ensayo	Cantidad de muestra requerida
Proctor modificado	5 x 7 kg
Resistencia a la tracción indirecta (diam. 150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Resistencia a la compresión no confinada (diam. 150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Diseño de estabilización con asfalto (probetas Marshall)	>10 kg por contenido de estabilizador
Contenido de humedad	Aproximadamente 1 kg

Contenido de humedad higroscópico

Se necesitan dos muestras de 1 kg aproximadamente (o más si es que el agregado es más grueso), las cuales se secan al aire y luego se pesan. Posteriormente las muestras se colocan en un horno a una temperatura entre 105°C y 110°C hasta que alcancen una masa constante, que debe registrarse. El contenido de humedad higroscópico es la pérdida de masa expresada como un porcentaje de la masa seca de la muestra.

10.3.2 Procedimiento de Diseño de Mezclas

10.3.2.1 Determinación del contenido óptimo de fluido (OFC) y la Densidad seca máxima (MDD)

El contenido de fluido en una mezcla considera la humedad en el agregado y bitumen. La humedad mantiene suspendidos los finos, dejándolos disponibles para mezclarse con el betún, además de entregar trabajabilidad a la mezcla, reducir el ángulo de fricción y lubricarla para la compactación.

En mezclas estabilizadas con asfalto espumado se puede asumir que el OFC es igual al OMC determinado para muestras representativas de materiales no tratados. Lo mismo aplica para la densidad MDD.

10.3.2.2 Preparación del material estabilizado con asfalto espumado

Determinación de propiedades de espumación

Como ya se ha mencionado, la razón de expansión y vida media son las propiedades que permiten caracterizar una espuma asfáltica. El objetivo en un diseño de mezclas es encontrar la temperatura y porcentaje de agua que permitan producir la espuma de mejor calidad (máxima razón de expansión y vida media) para un asfalto determinado. Los pasos para esta determinación se enumeran a continuación:

- Paso 1.** Calentar el asfalto en el recipiente calentador (Ejemplo: WLB 10) con la bomba circulando asfalto por el sistema, hasta alcanzar 160°C. Mantenga esta temperatura por al menos 5 minutos antes de comenzar las pruebas.
- Paso 2.** Calibrar la razón de descarga de asfalto y ajuste el temporizador para descargar 500 g de asfalto.

- Paso 3.** Ajustar el medidor de caudal de agua para alcanzar la razón de inyección requerida de agua (normalmente comenzando con un 2% de la masa de asfalto).
- Paso 4.** Descargar el asfalto espumado dentro de un recipiente de acero precalentado ($\pm 75^{\circ}\text{C}$) durante un tiempo de rocío calculado para 500 g de asfalto. Inmediatamente después que la descarga de espuma se detiene, cronometrar el tiempo.
- Paso 5.** Medir la altura máxima alcanzada por el asfalto espumado en el recipiente. Registrar el valor como volumen máximo.
- Paso 6.** Medir el tiempo, en segundos, que tarda la espuma en colapsar a la mitad de su volumen máximo. Registrar el valor como vida media.
- Paso 7.** Repetir el procedimiento anterior tres veces o hasta alcanzar lecturas similares.
- Paso 8.** Repetir los pasos 3 al 7 para distintas razones de inyección de agua. Los valores generalmente usados son 2%, 3% y 4% por la masa de asfalto.
- Paso 9.** Generar un gráfico de 3 ejes para la razón de expansión y vida media en función de las diferentes razones de inyección de agua. El contenido óptimo de agua será el promedio de los dos contenidos de agua que arrojen los mínimos valores de razón de expansión y vida media.
- Paso 10.** Repetir los pasos 1 al 9 para otras dos temperaturas de asfalto. Se sugiere 170°C y 180°C .

Si los parámetros mínimos no se logran alcanzar, el asfalto debe ser rechazado como inadecuado para la espumación.

Preparación de muestras

- Paso 1.** Colocar la cantidad de muestra requerida dentro de un contenedor mezclador adecuado. Usar 10 kg para la elaboración de probetas de 100 mm de diámetro, o 20 kg para probetas de 150 mm de diámetro.
- Paso 2.** Determinar la masa seca de la muestra usando la ecuación 16.

$$M_{muestra} = \frac{M_{seca-aire}}{\left(1 + \left(\frac{W_{seca-aire}}{100}\right)\right)} \quad (16)$$

Donde: $M_{muestra}$ = masa seca de la muestra [g]

$M_{seca-aire}$ = masa de la muestra secada al aire [g]

$W_{seca-aire}$ = contenido de humedad de la muestra secada al aire [%]

- Paso 3.** Determinar el porcentaje de filler activo requerido usando la ecuación 17.

$$M_{filler} = \frac{F_{add}}{100} \times M_{muestra} \quad (17)$$

Donde: M_{filler} = masa de filler requerido [g]

Paso 4. Determinar el porcentaje y la masa de agua a añadir a la muestra para lograr un mezclado óptimo usando la ecuación 18 y la ecuación 19, respectivamente.

$$W_{add} = 1 + (0,5 W_{OMC} - W_{aire-seca}) \quad (18)$$

$$M_{agua} = \frac{W_{add}}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler}) \quad (19)$$

Donde: W_{add} = agua agregada a la muestra [%]

W_{OMC} = contenido de humedad óptimo [%]

$W_{seca-aire}$ = contenido de humedad de la muestra secada al aire [%]

M_{agua} = masa de agua agregada [g]

Paso 5. Mezclar el material con el filler activo y agua hasta que quede uniforme. Notar que el material no debe quedar adherido a las paredes del mezclador. Esto puede ocurrir si el contenido de humedad es muy alto, por lo que se debe mezclar una nueva muestra con un contenido de humedad inferior. Si al hacer esto se observa alguna partícula de polvo al final del proceso de mezclado, entonces agregar pequeñas cantidades de agua y mezclar hasta alcanzar un estado suelto y sin polvo.

Paso 6. Determinar el asfalto espumado a ser agregado usando la ecuación 20.

$$M_{bitumen} = \frac{B_{add}}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler}) \quad (20)$$

Donde: $M_{bitumen}$ = masa del asfalto agregado [g]

B_{add} = contenido del asfalto espumado [%]

Paso 7. Determinar el ajuste del temporizador usando la ecuación 21.

$$T = factor \times (M_{bitumen} + Q_{bitumen}) \quad (21)$$

Donde: T = tiempo de ajuste en el temporizador [s]

$factor$ = compensación de pérdidas de asfalto en el equipo mezclador. Los valores recomendados son 1,1 para un mezclador Hobart y 1,0 para un mezclador tipo tornillo.

$Q_{bitumen}$ = caudal de asfalto [g/s]

Paso 8. Colocar el mezclador mecánico adyacente al laboratorio de espumado de modo que el asfalto espumado pueda descargarse directamente en el mezclador

Paso 9. Comenzar el mezclado y mantenerlo por al menos 10 segundos antes de descargar la masa de asfalto espumado requerida dentro del mezclador. Una vez que se haya descargado completamente, seguir mezclando durante 30 segundos más.

Paso 10. Determinar la cantidad de agua requerida para que la mezcla alcance el contenido óptimo de humedad usando la ecuación 22.

$$M_{plus} = \frac{W_{OMC} - W_{muestra}}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler}) \quad (22)$$

Donde: M_{plus} = masa de agua agregada [g]

$W_{muestra}$ = contenido de humedad de la muestra preparada [%]

Paso 11. Agregar la cantidad de agua adicional y mezclar hasta que quede uniforme.

Paso 12. Traspasar el material tratado con asfalto espumado a un contenedor y sellarlo inmediatamente para que no pierda humedad. Las probetas deben confeccionarse cuanto antes a fin de minimizar la pérdida de humedad de la muestra preparada.

Paso 13. Repetir todos los pasos anteriores para un mínimo de cuatro contenidos diferentes de asfalto espumado.

10.3.2.3 Fabricación de probetas de 100 mm de diámetro

Compactación y curado

Paso 1. Limpiar los utensilios para la compactación con el método Marshall (molde, plato base, collar y cara de compactación del martillo). El equipo no debe ser calentado previamente, sino que mantenerse a temperatura ambiente.

Paso 2. Pesar el material suficiente para alcanzar una altura de compactación de 63,5 mm $\pm$ 1.5 mm. Acomode la mezcla 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la superficie, dejándola levemente redondeada.

Paso 3. Aplicar 75 golpes con el martillo de compactación, asegurándose que el martillo caiga libremente.

Paso 4. Retirar el molde y collar del pedestal e invertir la probeta. Reensamblar el molde y compactar la otra cara aplicando 75 golpes nuevamente.

Paso 5. Después de la compactación, retirar el molde del plato base y desmoldar la probeta. Notar que ciertos materiales, carentes de cohesión, pueden requerir permanecer en el molde hasta 24 horas para desarrollar la resistencia.

Paso 6. Colocar las probetas sobre una bandeja plana y curar en un horno con aire forzado durante 72 horas a 40°C. Retirar del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Determinación de la densidad bruta

Una vez que las probetas ya se han enfriado, seguir el siguiente procedimiento:

Paso 1. Determinar la masa.

Paso 2. Medir la altura en cuatro puntos distintos espaciados uniformemente y calcular la altura promedio de la probeta. Medir el diámetro.

Paso 3. Calcular la densidad bruta usando la ecuación 23.

$$DB = (4 \times M_{probeta})(\pi \times d^2 \times h) \times 1000 \quad (23)$$

Donde: DB = densidad bruta [kg/m^3]

$M_{probeta}$ = masa de la probeta [g]

d = diámetro de la probeta [cm]

h = altura promedio de la probeta [cm]

Excluya cualquier probeta cuya densidad difiera del promedio en más de 50 [kg/m^3]. El valor de la densidad puede verificarse usando el método de $\frac{\text{peso en aire}}{\text{peso en agua}}$.

10.3.2.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Las probetas de 100 mm son ensayadas para la resistencia a la tracción indirecta bajo condición seca y saturada. Los resultados de ITS son graficados con respecto al contenido de asfalto que fue agregado. Luego, el contenido de asfalto óptimo es aquel que permite alcanzar las mejores propiedades. El procedimiento de este ensayo se encuentra más adelante, en la sección Ensayos de resistencia a las probetas 10.3.2.6.

10.3.2.5 Fabricación de probetas de 150 mm de diámetro

Compactación y curado

Paso 1. Preparar 24 kg de muestra con el contenido óptimo de asfalto obtenido anteriormente.

Paso 2. Añadir, cuando se requiera, la humedad suficiente para alcanzar el contenido de humedad óptimo de compactación, mezclar hasta que quede uniforme y colocar inmediatamente en un contenedor sellado.

Paso 3. Tomar muestras representativas (1 kg aproximadamente) de la primera y tercera probeta compactada y secar hasta masa constante. Determinar la humedad de cada probeta usando la ecuación 24.

$$W_{probeta} = \frac{M_{humedo} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100 \quad (24)$$

Donde: $W_{probeta}$ = contenido de humedad de la probeta [%]

M_{humedo} = masa del material húmedo [g]

M_{seco} = masa del material seco [g]

- Paso 4.** Compactar al menos cuatro probetas usando el compactador giratorio.
- Paso 5.** Cortar y apartar cuidadosamente el exceso de material de la cara superior de la probeta.
- Paso 6.** Remover las probetas del molde cuidadosamente y ubicarlas en una bandeja. Dejarlas a temperatura ambiente durante 24 horas o hasta que el contenido de humedad se reduzca al 50% de OMC, o un valor menor. Notar que, para ciertos materiales carentes de cohesión, puede ser necesario dejarlos en el molde por 24 horas para que desarrollen resistencia antes de extraerlas.
- Paso 7.** Colocar cada probeta en el horno a 40 °C durante 48 horas.
- Paso 8.** Retirar las probetas de horno y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Paso 9.** Una vez frías, determinar la masa de cada probeta. Calcular su densidad a través de la ecuación 25.

$$DB_{probeta} = \frac{M_{probeta}}{V_{probeta}} \times 1000 \quad (25)$$

Donde: $DB_{probeta}$ = densidad bruta de la probeta [kg/m^3]

$V_{probeta}$ = volumen de la probeta [cm^3]

Las probetas deben ser ensayadas cuanto antes para prevenir la pérdida de humedad. De las cuatro probetas fabricadas, normalmente dos son ensayadas para ITS y dos para UCS.

10.3.2.6 Ensayos de resistencia a las probetas

A continuación, se entregan los procedimientos de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS) y de resistencia a la compresión no confinada (UCS).

Determinación de la resistencia a la tracción indirecta (ITS)

Este ensayo puede realizarse bajo diferentes condiciones de humedad: seco, saturado y contenido de humedad de equilibrio, y entrega una medida indirecta de la resistencia a la tracción y flexibilidad de la mezcla estabilizada. El ITS corresponde a la carga última que soporta una probeta sujeta a una razón de deformación de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral.

También es posible obtener el porcentaje de resistencia a la tracción retenida (TSR), cuyo valor es útil para identificar problemas del material. Cuando éste sea menor al 50%, se recomienda el uso de un filler activo.

- Paso 1.** Ubicar la probeta en el cabezal para ensayos ITS de tal forma que las bandas de carga estén paralelas y centradas en el plano vertical diametral.
- Paso 2.** Ubicar el plato de transferencia de carga sobre la banda superior y colocar el cabezal de ensayo ensamblado de manera que quede centrado bajo el pistón de carga de la máquina de compresión.

- Paso 3.** Aplicar carga a la probeta a una razón de 50.8 mm/minuto hasta llegar a su falla. Registrar la carga P en kN con una aproximación a 0.1 kN.
- Paso 4.** Romper la probeta inmediatamente y tomar una muestra de 1000 g aproximadamente para determinar su contenido de humedad W_{falla} .
- Paso 5.** Calcular el ITS de la probeta con aproximación a 1 kPa usando la ecuación 26.

$$ITS = \frac{(2 \times P)}{\pi \times h \times d} \times 10^4 \quad (26)$$

Donde: ITS = resistencia a la tracción indirecta [kPa]

P = carga máxima aplicada [kN]

- Paso 6.** Para calcular el ITS en condición saturada, sumergir las probetas en agua a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Retirar las probetas del agua, secarlas superficialmente y repetir los pasos 1 al 5.
- Paso 7.** Obtener el valor de TSR como la relación porcentual entre el ITS en condición seca y saturada, de acuerdo con la ecuación 27.

$$TSR = \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}} \times 100 \quad (27)$$

Donde: TSR = razón de resistencia a la tracción retenida [%]

Si un material presenta un TSR menor a 50% y, además el ITS_{seco} excede los 400 kPa, es muy probable que dicho material contenga arcilla, por lo que el betún sería inefectivo. Frente a esta situación el material probablemente requiere un pretratamiento.

Determinación de la resistencia a la compresión no confinada (UCS)

Este ensayo se realiza a probetas con un contenido de humedad de equilibrio, esto pues se asumen que es representativo de las condiciones reales del pavimento. El UCS se determina por la carga última de falla de una probeta de 150 mm de diámetro y 127 mm de alto, sujeta a una razón de carga constante de 140 kPa/s (153 kN/min). El procedimiento es el siguiente:

- Paso 1.** Ubicar la probeta de manera centrada entre las placas de compresión de la máquina de ensayo.
- Paso 2.** Aplicar carga a la probeta a una razón de avance de 140 kPa/s hasta alcanzar la carga máxima. Registrar dicha carga P en kN, con aproximación a 0.1 kN.
- Paso 8.** Romper la probeta inmediatamente y tomar una muestra de 1000 g aproximadamente para determinar su contenido de humedad W_{falla} .
- Paso 3.** Calcular el UCS de a probeta con aproximación a 1 kPa usando la ecuación 28.

$$UCS = \frac{(4 \times P)}{\pi \times d^2} \times 10^4 \quad (28)$$

Donde: UCS = resistencia a la compresión no confinada [kPa]

P = carga máxima aplicada [kN]

Determinación de la densidad seca

Utilizando los valores de contenido de humedad obtenido en cada uno de los ensayos recién descritos, calcular la densidad seca usando la ecuación 29.

$$DD = \frac{M_{probeta}}{V_{probeta}} \times \frac{100}{W_{falla} + 100} \times 1000 \quad (29)$$

Donde: DD = densidad seca [kg/m^3]

$M_{probeta}$ = masa de la probeta curada [g]

$V_{probeta}$ = volumen de la probeta [cm^3]

W_{falla} = contenido de la probeta [%]

10.4 Tránsito aéreo en Región de Aysén

Tabla 10-5: Aeronaves con base en la región de Magallanes.

#	MATRICULA	MARCA	MODELO	PAX	MTOW (Kg)	TIPO AERONAVE
1	CHV	DEHAVILLAND	DHC-6-300	19	5680	AVIÓN
2	CMV	AEROSPATIALE	AS 355 F2	6	2540	HELICÓPTERO
3	CCA	EUROCOPTER	EC 135 T1	7	2840	HELICÓPTERO
4	CHQ	EUROCOPTER	BO-105 CB-4	4	2400	HELICÓPTERO
5	CLV	CESSNA	402C	9	3110	AVIÓN
6	COV	CESSNA	402C	9	3110	AVIÓN
7	CLY	BEECHCRAFT	100	10	4820	AVIÓN
8	MBA	PIPER	PA28-140	3	980	AVIÓN
9	MBC	PIPER	PA32-300	5	1540	AVIÓN
10	PKN	PIPER	PA28-236	3	1360	AVIÓN
11	CHR	EUROCOPTER	BO-105 CB-4	4	2400	HELICÓPTERO
12	AEH	CESSNA	404	9	3820	AVIÓN
13	ACM	MESSERSCHMITT- BOLKOW-BLOHM	BO-105S CBS-4	4	2500	HELICÓPTERO
14	ACN	MESSERSCHMITT- BOLKOW-BLOHM	BO-105S CBS-4	4	2500	HELICÓPTERO
15	ACQ	BEECHCRAFT	300	9	6360	AVIÓN
16	AEJ	MESSERSCHMITT- BOLKOW-BLOHM	BO-105S CBS-4	4	2500	HELICÓPTERO
17	AEK	EUROCOPTER	AS 350 B3	5	2250	HELICÓPTERO

Tabla 10-6: Aeronaves con base en la región de Los Lagos.

#	MATRICULA	MARCA	MODELO	PAX	MTOW (Kg)	TIPO AERONAVE
1	AER	ALUMAS	PELICANO	1	650	AVIÓN
2	CDR	CESSNA	208B	9	3970	AVIÓN
3	CFF	CESSNA	402C	9	3110	AVIÓN
4	CFL	CESSNA	T310R	5	2500	AVIÓN
5	CFM	CESSNA	208B	9	3980	AVIÓN
6	CFN	DEHAVILLAND	DHC-6-300	19	5680	AVIÓN
7	CJA	PIPER	PA-31	7	2950	AVIÓN
8	CJB	PIPER	PA-31	7	2950	AVIÓN
9	CMH	PIPER	PA31T	7	4090	AVIÓN
10	CMY	PIPER	PA-31	7	2950	AVIÓN
11	CTS	CESSNA	208B	9	3970	AVIÓN
12	CWM	SWFA	UH-1H	0	4320	HELICÓPTERO
13	CXN	BEECHCRAFT	95-B55	5	2320	AVIÓN
14	CYR	PILATUS BRITTEN-NORMAN	BN-2B-27	9	2900	AVIÓN
15	PAC	PILATUS BRITTEN-NORMAN	BN-2B-27	9	2900	AVIÓN
16	PDI	PIPER	PA12	2	790	AVIÓN
17	PHE	CESSNA	R172K	3	1160	AVIÓN
18	PJH	PIPER	PA31T	7	4090	AVIÓN
19	POO	CESSNA	170A	3	1000	AVIÓN
20	PSP	ROBINSON	R22 MARINER	1	620	HELICÓPTERO
21	PYG	CESSNA	TU206G	5	1630	AVIÓN
22	PYU	CESSNA	TU206G	5	1730	AVIÓN
23	PYX	CHRISTEN	HUSKY A-1	1	820	AVIÓN
24	PZR	BEECHCRAFT	V35	4	1540	AVIÓN
25	SMA	CESSNA	A152	1	760	AVIÓN
26	SMB	CESSNA	172P	3	1090	AVIÓN
27	SMC	CESSNA	172N	3	1040	AVIÓN
28	SML	CESSNA	172K	3	1040	AVIÓN
29	SMN	CESSNA	150K	1	730	AVIÓN
30	SMR	CESSNA	172R	3	1110	AVIÓN
31	SMW	CESSNA	152	1	760	AVIÓN
32	SMZ	CESSNA	R182	3	1410	AVIÓN

10.5 Caminos de bajo volumen de tránsito

La dirección de vialidad encargó el desarrollo de una guía de diseño para caminos de bajo volumen de tránsito, es decir, con hasta 1 millón de ejes equivalentes, incluyendo tanto caminos de tránsito liviano como pesado.

Una de las estructuras tipo que ahí se presentan está compuesta como se indica en la figurita. La capa de protección corresponde a algún tipo de tratamiento superficial y la capa estabilizada

contempla la técnica de asfalto espumado y emulsión asfáltica. Además, se considera una subbase granular de CBR 40% en caso de requerirse

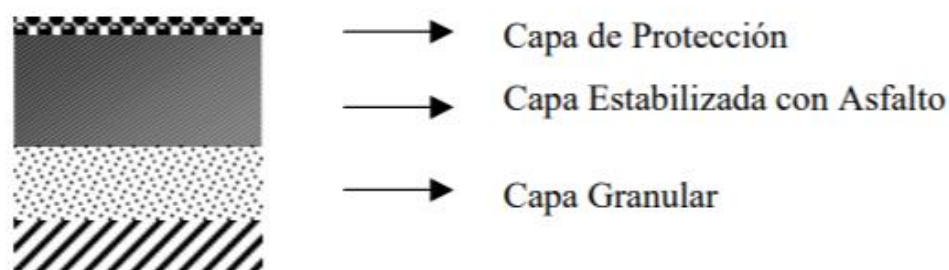


Figura 10-1: Estructura tipo para tránsito pesado. DV, 2002.

Cabe destacar que el peso límite de los ejes de vehículos considerado fue de 25 T, siendo bastante mayor a los pesos de las aeronaves que utilizan las pistas. Por otro lado, se debe tener en cuenta que esta guía apunta a mejorar condiciones de caminos para que tengan una vida útil entre 5-10 años, rango que está por debajo de lo que se espera de una conservación aeroportuaria.

Ahora, tomando en cuenta el clima de la región, lo más apropiado sería utilizar una cartilla para la condición normal – saturada, a la cual debe ingresarse con el valor de CBR de la subrasante y el nivel de tránsito en el año 0.

Los valores de espesores indicados fueron obtenidos a través del método AASHTO, utilizando ecuaciones de fatiga apropiadas para cada capa de material. En cuanto a la mezcla con asfalto espumado, esta guía supone que puede representarse con módulo resiliente de 2000 MPa.